

ISSN(Print) 2073-6185

ISSN (On-line) 2542-095X

Министерство высшего образования и науки Российской Федерации
Ministry of Higher Education and Science of the Russian Federation
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Дагестанский государственный технический университет»



Том 45, №2, 2018.

ВЕСТНИК

ДАГЕСТАНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА.
ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Volume 45, No.2, 2018.

HERALD

OF DAGHESTAN STATE TECHNICAL UNIVERSITY.
TECHNICAL SCIENCES

Журнал основан в 1997 году.

Выходит 4 раза в год

Научно-исследовательский журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (РОСКОМНАДЗОР), свидетельство ПИ № ФС77-30186 от 9 ноября 2007г. Подписной индекс Т71366 в федеральном каталоге периодических изданий ОАО Агентства «Роспечать».

Журнал включен в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий ВАК Российской Федерации, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук. Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ), доступный в интернете, по адресу <http://www.elibrary.ru> (Научная электронная библиотека).

Журнал включен в российские и международные открытые репозитории научной информации; подключен к международной системе библиографических ссылок и находится в директории журналов открытого доступа: CrossRef; GoogleScholar; Ulrich's Periodicals Directory; Open Archives; Research Bible; Directory of Open Access Journals (DOAJ); Соционет, КиберЛенинка.

© Учредитель и издатель ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет», 2018.

The research journal is registered in Federal Service for Supervision in the Sphere of Telecom, Information Technologies and Mass Communications (ROSKOMNADZOR), the certificate of PI No. FS77-30186 of November 9, 2007. Subscription index T71366 is in the federal catalogue of periodicals of the JSC Rospechat Agency.

The journal is included in the List of leading reviewed scientific journals and periodicals of the Higher Certifying Commission (VAK) of the Russian Federation, in which basic scientific results of dissertations are to be published. The journal is included in the Russian Index of Scientific Citing (RISC) available on the Internet (<http://www.elibrary.ru> Scientific electronic library).

The journal is included in the Russian Citing Systems (RCS) and in the open repositories of scientific information connected with international system of bibliographic references: CrossRef; Google Scholar; Ulrich's Periodicals Directory; Open Archives; Research Bible; Directory of Open Access Journals (DOAJ); Socionet; CyberLeninca.

© **Founder and Publisher Daghestan State Technical University, 2018.**

Министерство высшего образования и науки Российской Федерации
Ministry of Higher Education and Science of the Russian Federation
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Дагестанский государственный технический университет»

ВЕСТНИК ДАГЕСТАНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА. ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ. ТОМ 45, №2, 2018

Главный редактор:

Исмаилов Т.А., д.т.н., профессор, ректор Дагестанского государственного технического университета, г. Махачкала, Россия.

Заместитель главного редактора:

Эсетова А.М., д.э.н., профессор Дагестанского государственного технического университета, г. Махачкала, Россия.

Редакционная коллегия:

Абакаров А.Д., д.т.н., профессор, зав. кафедрой Дагестанского государственного технического университета, г. Махачкала, Россия.

Абакаров Г.М., д.х.н., профессор, зав. кафедрой Дагестанского государственного технического университета, г. Махачкала, Россия.

Абдулгалимов А.М., д.э.н., профессор, зав. кафедрой Дагестанского государственного технического университета, г. Махачкала, Россия.

Адамов А.П., д.т.н., профессор Дагестанского государственного технического университета, г. Махачкала, Россия.

Андреев В.И., д.т.н., профессор, зав. кафедрой Национального исследовательского Московского государственного строительного университета, г. Москва, Россия.

Батдалов М.М., д.т.н., член-корр. Российской академии архитектуры и строительных наук, профессор Дагестанского государственного технического университета, г. Махачкала, Россия.

Былалов Б.А., д.ф.-м.н., профессор, зав. кафедрой Дагестанского государственного технического университета, г. Махачкала, Россия.

Володин В.М., д.э.н., профессор, декан Пензенского государственного университета, г. Пенза, Россия.

Гулиев М.Е., д.э.н., профессор Азербайджанского государственного экономического университета, г. Баку, Азербайджанская республика.

Давидок А.Н., д.т.н., заслуженный строитель России, директор НИИЖБ им. А.А.Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», г. Москва, Россия.

Иванов А.П., д.ф.-м.н., профессор, зав. кафедрой Московского физико-технического института (государственного университета), г. Долгопрудный, Россия.

Исалова М.Н., д.э.н., профессор, зав. кафедрой Дагестанского государственного технического университета, г. Махачкала, Россия.

Исмаилов Э.Ш., д.б.н., профессор Дагестанского государственного технического университета, г. Махачкала, Россия.

Казачек В.Г., д.т.н., профессор, главный научный сотрудник Института жилища - НИПТИС им. Атаева С.С., директор ООО «Мобильная диагностика в строительстве», г. Минск, Республика Беларусь.

Каргин Н.И., д.т.н., профессор, директор Института нанотехнологий в электронике, спинтронике и фотонике Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Москва, Россия.

Кругляков А.А., д.т.н., профессор, генеральный директор научно-коммерческой фирмы WBN, г. Берлин, Германия.

Кутузов В.М., д.т.н., профессор Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ «ЛЭТИ»), г. Санкт-Петербург, Россия.

Ларионов А.Н., д.э.н., профессор, генеральный директор ООО «Научно-исследовательский центр «Стратегия», г. Москва, Россия.

Лобанов И.Е., д.т.н., ведущий научный сотрудник Московского авиационного института (Национальный исследовательский университет), г. Москва, Россия.

Магомедов М. Х., д-р. физ.-мат. наук, генеральный директор ООО «САУНО», НПФ, г. Москва, Россия.

Мажиев Х.Н., д.т.н., профессор Грозненского государственного нефтяного технического университета им. Академика М.Д. Миллионщикова, г. Грозный, Россия.

Мелехин В.Б., д.т.н., профессор Дагестанского государственного технического университета, г. Махачкала, Россия.

Митаров Р.Г., д.ф.-м.н., профессор, Дагестанского государственного технического университета, г. Махачкала, Россия.

Несветаев Г.В., д.т.н., профессор, зав. кафедрой Донского государственного технического университета, г. Ростов-на-Дону, Россия.

Оборин М.С., д.э.н., профессор Пермского государственного национального исследовательского университета, г. Пермь, Россия.

Павлюченко Е.И., д.э.н., профессор Дагестанского государственного технического университета, г. Махачкала, Россия.

Рогозин Е.А., д.т.н., профессор Воронежского института Министерства внутренних дел России, г. Воронеж, Россия.

Саркаров Т.Э., д.т.н., профессор, зав. кафедрой Дагестанского государственного технического университета, г. Махачкала, Россия.

Сафаралиев Г.К., д.ф.-м.н., член-корр. РАН, научный руководитель НИИ «Микроэлектроники и нанотехнологий» Дагестанского государственного технического университета, г. Махачкала, Россия.

Сулин А.Б., д.т.н., профессор, член-корр. МАХ, НИИ промышленной и морской медицины федерального медико-биологического агентства, г. Санкт-Петербург, Россия.

Финаев В.И., д.т.н., профессор, зав. кафедрой Южного федерального университета, г. Ростов-на-Дону, Россия.

Хаджишалапов Г.Н., д.т.н., профессор Дагестанского государственного технического университета, г. Махачкала, Россия.

Шахтарин Б.И., д.т.н., профессор Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия.

Эмиров Ю.Н., д.ф.-м.н., ученый-исследователь Центра нанотехнологий Университета Южной Флориды, США.

Редакционный совет:

Председатель редакционного совета:

Якимович Б.А., д.т.н., профессор, Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашникова, г. Ижевск, Россия.

Сопредседатели:

Иванов К.М., д.т.н., профессор, ректор БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург, Россия.

Исмаилов Т.А., д.т.н., профессор, ректор Дагестанского государственного технического университета, г. Махачкала, Россия.

Кутузов В.М., д.т.н., профессор Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ «ЛЭТИ»), г. Санкт-Петербург, Россия.

Члены редакционного совета

Бабанлы М.Б.-О., д.т.н., профессор, ректор Азербайджанского государственного университета нефти и промышленности, г. Баку, Азербайджанская республика.

Джанзаков И.И., д.т.н., профессор, член-корр. НИА РК, академик МАНЭБ, г. Атырау, Республика Казахстан.

Хачумов В.М., д.т.н., профессор, заведующий лабораторией Института системного анализа РАН, г. Москва, Россия.

Якунин А.Г., д.т.н., профессор, зав. кафедрой Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова, г. Барнаул, Россия.

Научные направления:
Физико-математические науки
Механика

Технические науки

Энергетическое, металлургическое и химическое машиностроение

Информатика, вычислительная техника и управление

Строительство и архитектура

Экономические науки

Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. Том 45, №2 Махачкала, 2018 – 236с.

Издается по решению Ученого Совета ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет»

Адрес учредителя и издателя:

367026, РД, г. Махачкала, пр. И.Шамяла, 70, ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет». Тел./факс 8722)623715; (8722)623964 e-mail: vestnik.dgtu@mail.ru Website: <http://vestnik.dgtu.ru/>

СОДЕРЖАНИЕ

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

МЕХАНИКА 8

Вагабов Н.М., Курбанов А.З., Магомедова М.А.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ КОМБИНИРОВАННОГО ИНСТРУМЕНТА
ЗЕНКЕР-МЕТЧИК ДЛЯ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ СУДОВЫХ МАШИН,
МЕХАНИЗМОВ И СУДОВОЙ АРМАТУРЫ 8

Иванычев Д.А.

МЕТОД ГРАНИЧНЫХ СОСТОЯНИЙ В ЗАДАЧАХ МЕХАНИКИ
ДЛЯ АНИЗОТРОПНЫХ ТОНКИХ ПЛИТ 18

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ
МАШИНОСТРОЕНИЕ 31

Адалаева П.Ш., Айгумов Т.Г., Магомедова С.В., Челушкина Т.А.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ВОЗДУШНЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ЦЕЛЕЙ ПРИ ПОМОЩИ
ЭФФЕКТА ДОПЛЕРА ОТ НАГРЕТОГО РЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ 31

Бадалян Н.П., Колесник Г.П., Соловьёва С.Г., Чащин Е.А.

ПРОДОЛЬНАЯ КОМПЕНСАЦИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В КОРОТКОЙ
СЕТИ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ ПЕЧИ 42

Годжаев К.М.

ВЛИЯНИЕ МЕТОДА ДОЗИРОВАНИЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОГО
ТОПЛИВНОГО НАСОСА ДИЗЕЛЯ 52

Гюльмагомедов К.С., Магомадов Р.А.-М., Миснахов И.Ш., Набиев Н.А., Рагимова Т.А.

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ОСТАНОВКИ КРОВОТЕЧЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОЛИ
С НИЗКОЙ КРИОГИДРАТНОЙ ТЕМПЕРАТУРОЙ РАСТВОРЕНИЯ 62

Лобанов И.Е.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ НИЗКОРЕЙНОЛЬДСОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА
ПРИ ТУРБУЛЕНТНОМ ТЕЧЕНИИ В ПЛОСКИХ КАНАЛАХ С СИММЕТРИЧНО
РАСПОЛОЖЕННЫМИ НА ОБЕИХ СТОРОНАХ ТУРБУЛИЗАТОРАМИ 70

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ 94

Асланов Г.К., Асланов Т.Г., Казибеков Р.Б., Тетакаев У.Р.

ОЦЕНКА ОШИБОК, ВЫЗЫВАЕМЫХ ВЫХОДОМ ИЗ СТРОЯ ЭЛЕМЕНТОВ АНТЕННОЙ
СИСТЕМЫ АЭРОДРОМНОГО АВТОМАТИЧЕСКОГО РАДИОПЕЛЕНГАТОРА. 94

Дульцев Д.В., Сучкова Л.И.

ОПИСАНИЕ И ИДЕНТИФИКАЦИЯ ТЕМПОРАЛЬНЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ
ДЛЯ НЕЧЕТКОГО ВРЕМЕННОГО РЯДА С ПРИМЕНЕНИЕМ ГИБРИДНЫХ
ОЛС-ПАТТЕРНОВ 104

Качаева Г.И., Мустафаев А.Г.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА
ЭЛЕКТРОКАРДИОГРАММ ПРИ ДИАГНОСТИКЕ ЗАБОЛЕВАНИЙ СЕРДЕЧНО-
СОСУДИСТОЙ СИСТЕМЫ 114

Кузнецов И.Е., Мельников А.В., Rogozin E.A., Страшко О.В. МЕТОДИКА УЧЕТА ВЛИЯНИЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ НА ОСНОВЕ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА	125
Минаева Ю.В. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПТИМИЗАЦИИ ИЕРАРХИЧЕСКИХ МНОГОУРОВНЕВЫХ СИСТЕМ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ТИПА	140
Михитаров А.Р., Савич В.Л., Хегай В.К. К ВОПРОСУ ОПТИМИЗАЦИИ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИБРОКОРЧЕВАЛЬНОЙ МАШИНЫ	149
Моисеева Т.В., Поляева Н.Ю. ИНФОКОММУНИКАЦИОННАЯ ПОДДЕРЖКА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ АКТОРОВ В ТЕОРИИ ИНТЕРСУБЪЕКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ	158
СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА	171
Батаев Д. К.-С., Газиев М.А., Маилян Д.Р., Мажиев Х.Н. ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ И ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ПРЕДНАПРЯЖЕННЫХ СТЕНОВЫХ ПАНЕЛЕЙ ИЗ ЯЧЕЙСТЫХ БЕТОНОВ	171
Богатина А.Ю., Моргун В.Н., Моргун Л.В. О СПОСОБЕ УПРАВЛЕНИЯ СТРУКТУРНО-МЕХАНИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ ПЕНОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ	183
Булгаков А.И., Вишталов, Муселемов Х., Устарханов О.М. РАСЧЕТ ТРЕХСЛОЙНЫХ ТРУБ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА НА ПК «ЛИРА	191
ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ	200
Купчикова Н.В., Николаенко М.Н., Овсянникова Т.Ю. УРОВЕНЬ РАЗВИТИЯ ГРАДОСТРОИТЕЛЬНОЙ СРЕДЫ НА УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЯХ АСТРАХАНСКОЙ ОБЛАСТИ	200
Магомедов М.Г., Павлюченко Е.И. СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К УПРАВЛЕНИЮ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ УЧАСТНИКОВ ИНВЕСТИЦИОННОГО ПРОЦЕССА В СТРОИТЕЛЬСТВЕ	209
Оборин М.С. АНТИКРИЗИСНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОМЫШЛЕННЫМ ПРОИЗВОДСТВОМ РЕГИОНОВ РОССИИ В УСЛОВИЯХ САНКЦИЙ	220
ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ	232

Ministry of Higher Education and Science of the Russian Federation
 Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education «Daghestan State Technical University»
 HERALD OF DAGHESTAN STATE TECHNICAL UNIVERSITY. TECHNICAL SCIENCES. V o l u m e 4 5 , N o . 2 , 2 0 1 8 .

Editor-in-Chief:

Tagir A. Ismailov, Doctor of Technical Science, Professor, Rector, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia;

Deputy Editor:

Aida M. Esetova, Doctor of Economics, Professor, Head of the Department, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia;

Editorial Board:

Abakar D. Abakarov, Doctor of Technical Science, Professor, Head of the Department, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia;

Gasan M. Abakarov, Doctor of Chemical Science, Professor, Head of the Department, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia;

Abdulgalim M. Abdulgalimov, Doctor of Economics, Professor, Head of the Department, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia;

Alexander P. Adamov, Doctor of Technical Science, Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia;

Vladimir I. Andreev, Doctor of Technical Science, Professor, Head of the Department, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russia;

Muhtaritdin M. Batdalov, Doctor of Technical Science, Corresponding member of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia;

Bilal A. Bilalov, Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Head of the Department, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia;

Viktor M. Volodin, Doctor of Economics, Professor, Dean, Penza State University, Penza, Russia.

Mushfig E. Guliev, Doctor of Economics, Professor, Azerbaijan State University of Economics, Baku, Azerbaijan;

Alexey N. Davidiyuk, Doctor of Technical Science, Honored Builder of Russia, Director, Gvozdev NII ZHB, JSC «SIC Construction», Moscow, Russia;

Alexander P. Ivanov, Moscow Institute of Physics and Technology (State University), Dolgoprudny, Russia.

Marzhanat N. Isalova, Doctor of Economics, Professor, Head of the Department, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia;

Elder Sh. Ismailov, Doctor of Biology, Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia;

Vladimir G. Kazachek, Doctor of Technical Science, Professor, senior researcher, Ataev Institute of Dwelling - NIPTIS Director of Mobile diagnostics in construction, Minsk, Republic of Belarus.

Nicholay I. Kargin, Doctor of Technical Science, Professor, Director Institute of Nanoengineering in Electronics, Spintronics and Photonics National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia;

Alexander A. Krugljakow, Doctor of Technical Science, Professor, General Director Wissenschaftliche Beratung und Handelsvertretung, Berlin, Germany / Deutschland.

Vladimir M. Kutuzov, Doctor of Technical Science, Professor, St. Petersburg Electrotechnical University «LETI», Saint-Petersburg, Russia;

Arkady N. Larionov, Doctor of Economics, Professor, General Director LLC Research Center «Strategy», Moscow, Russia.

Igor E. Lobanov, Doctor of Technical Science, Leading Researcher, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia.

Magomed Kh. Magomedov, Doctor of Mathematics and Physics, General Director, "SAUNO" Ltd. Moscow, Russia.

Khasan N. Mazhiev, Doctor of Technical Science, Professor, Millionshchikov Grozny State Oil Technical University, Grozny, Russia.

Vladimir B. Melekhin, Doctor of Technical Science, Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia;

Rizwan G. Mitarov, Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia;

Gregory V. Nesvetayev, Doctor of Technical Science, Professor, Head of Construction Technologies Department, Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia.

Matvey S. Oborin, Doctor of Economics, Professor, Perm State University, Perm, Russia.

Elena I. Pavlyuchenko, Doctor of Economics, Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia;

Evgenii A. Rogozin, Doctor of Technical Science, Professor, Voronezh Institute of the Ministry of the Interior of Russia, Voronezh, Russia.

Tazhudin E. Sarkarov, Doctor of Technical Science, Professor, Head of the Department, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia;

Gadzhimet K. Safaraliyev, Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Scientific Director of the «Microelectronics and Nanotechnology» Research Institute, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia;

Alexander B. Sulin, Doctor of Technical Science, Professor, Corresponding member, MAX, Institute of Industrial and Marine Medicine of Federal Medical and Biological Agency, St. Petersburg, Russia.

Valery I. Finayev, Doctor of Technical Science, Professor, Head of the Department, Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia;

Gadzhimurad N. Khadzishalapov, Doctor of Technical Science, Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia

Boris I. Shakhtarin, Doctor of Technical Science, Professor, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia.

Yousuf N. Emirov, Doctor of Physics and Mathematics, research associate, Nanotechnology Research and Education Center, University of South Florida, USA.

Editorial council

Chairman of the editorial council:

Boris A. Yakimovich, Doctor of Technical Science, Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia.

The co-chairs of the editorial council:

Konstantin M. Ivanov, Doctor of Technical Science, Professor, Rector, Ustinov Baltic State Technical University «VOENMECH», Saint-Petersburg, Russia

Tagir A. Ismailov, Doctor of Technical Science, Professor, Rector, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia.

Vladimir M. Kutuzov, Doctor of Technical Science, Professor, St. Petersburg Electrotechnical University «LETI», Saint-Petersburg, Russia;

Members of the editorial Board

Mustafa B.-O. Babanly, Doctor of Technical Science, Professor, Rector, Azerbaijan State University of Oil and Industry, Baku, Azerbaijan.

Islam I. Djanzakov, Doctor of Technical Science, Professor, Corresponding member, SRA RK, Academician of MANEB, Atyrau, Republic of Kazakhstan.

Vyacheslav M. Khachumov, Doctor of Technical Science, Professor, Head of laboratory, Institute for Systems Analysis of RAS, Moscow, Russia.

Alexey G. Yakunin, Doctor of Technical Science, Professor, Head of the Department, Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia.

Research areas

Physical-mathematical science
 Mechanics

Technical science
 Power,
 Metallurgical and
 Chemical
 Mechanical
 Engineering

Computer
 Science,
 Computer
 Engineering
 and
 Management

Building
 and
 Architecture

Economic science

Herald of Daghestan State Technical University. Technical Science
 Volume 45,
 No.2
 Makhachkala

2018–236p.

Published by
 decision of
 the Academic
 Council
 Daghestan
 State Technical
 University

Edition and Publisher address:

70 I. Shamil
 Ave.,
 Makhachkala,
 the Republic
 of Daghestan
 367026,
 Russia.
 Daghestan
 State Technical
 University
 Tel./fax
 (8722)623715
 (8722)623964

CONTENTS

PHYSICAL-MATEMATICAL SCIENCE

MECHANICS8

Nurulla M. Vagabov, Ali Z. Kurbanov, Marina A. Magomedova

COMBINED COUNTERSINK-TAP TOOL FOR THE PROCESSING OF PARTS OF SHIP MACHINES, MECHANISMS AND FITTINGS: DESIGN AND CALCULATIONS8

Dmitriy A. Ivanychev

EDGE STATE METHOD IN MECHANICS PROBLEMS CONCERNING ANISOTROPIC THIN PLATES18

TECHNICAL SCIENCE

POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL MECHANICAL ENGINEERING31

Patimat Sh. Adalaeva, Timur G. Aigumov, Sabina V. Magomedova, Tatyana A. Chelushkina

IDENTIFICATION OF AIR RADAR TARGETS USING THE DOPPLER EFFECT FROM A HEATED JET ENGINE31

Norayr P. Badalyan, Grigory P. Kolesnik, Sofia G. Solovyova, Yevgeny A. Chaschin

SERIES COMPENSATION OF REACTIVE POWER IN A LOW-VOLTAGE CIRCUIT OF THE ELECTRIC ARC FURNACE.42

Kurban M. Godzhaev

INFLUENCE OF THE METERING METHOD ON THE CHARACTERISTICS OF A DIESEL DISTRIBUTOR FUEL PUMP52

Kaziahmed S. Gulmagomedov, Nabi A. Nabiyev, Rustam A.M. Magomadov, Igramidin Sh. Mispahov, Tamila A. Ragimova

DEVICE FOR CAUTERY OF BLEEDING USING A SALT WITH LOW CRYOHYDRATE DISSOLUTION TEMPERATURE.62

Igor E. Lobanov

MATHEMATICAL LOW-REYNOLDS MODELING OF HEAT EXCHANGE IIN TURBULENT FLOW IN FLAT CHANNELS WITH TURBULATORS SYMMETRICALLY LOCATED ON BOTH SIDES70

COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT94

Gaidarbek K. Aslanov, Tagirbek G. Aslanov, Rustam B. Kazibekov, Umar R. Tetakaev

EVALUATION OF ERRORS CAUSED BY FAILURE OF ANTENNA SYSTEM ELEMENTS IN AN AERODROME AUTOMATIC RADIO DIRECTION FINDER.94

Denis V. Dultsev, Larisa I. Suchkova

DESCRIPTION AND IDENTIFICATION OF TEMPORAL REGULARITIES FOR FUZZY TIME SERIES WITH APPLICATION OF HYBRID OLS-PATTERNS.104

Gyulkhanum I. Kachayeva, Arslan G. Mustafayev

THE USE OF NEURAL NETWORKS FOR THE AUTOMATIC ANALYSIS OF ELECTROCARDIOGRAMS IN DIAGNOSIS OF CARDIOVASCULAR DISEASES114

<i>Ilya E. Kuznetsov, Aleksey V.Melnikov, Evgenii A. Rogozin, Oleg V. Strashko</i> METHODOLOGY FOR ACCOUNTING THE INFLUENCE OF METEOROLOGICAL FACTORS ON THE EFFICIENCY OF APPLICATION OF UNMANNED AERIAL VEHICLES ON THE BASIS OF SYSTEM ANALYSIS	125
<i>Yulia V. Minaeva</i> MATHEMATICAL MODEL FOR THE OPTIMISATION OF HIERARCHICAL MULTI-LEVEL PRODUCTION SYSTEMS	140
<i>Valery K. Khegai, Vasily L. Savich, Aleksander R.Mikhitarov</i> TO THE QUESTION OF OPTIMISING THE DYNAMIC CHARACTERISTICS OF A VIBRATIONAL TREE UPROOTING MACHINE	149
<i>Tatyana V. Moiseeva, Natalya Yu. Polyayeva</i> INFOCOMMUNICATION SUPPORT OF THE ACTORS' COLLABORATION IN THE INTERSUBJECTIVE MANAGEMENT THEORY	158
BUILDING AND ARCHITECTURE	171
<i>Deni K.-S.Bataev, Minkail A.Gaziev, Hasan N.Mazhiev, Dmitriy R.Mailyan</i> CRACK RESISTANCE AND DURABILITY OF PRESTRESSED WALL PANELS CONSTRUCTED FROM CELLULAR CONCRETE	171
<i>Alla Yu.Bogatina, Vladimir N.Morgun, Lyubov V.Morgun</i> METHOD FOR MANAGING THE STRUCTURAL-MECHANICAL PROPERTIES OF FOAM CONCRETE MIXTURES	183
<i>Aleksandr I. Bulgakov, Rajab I. Vishtalov, Hayrulla M. Muselemov, Osman M. Ustarkhanov</i> CALCULATION OF THREE-LAYER LARGE DIAMETER PIPES ON THE PC «LIRA» ...	191
ECONOMIC SCIENCE	200
<i>Natalya V. Kupchikova, Mariya N. Nikolaenko, Tatiana Yu. Ovsianikova</i> EFFECT OF THE DEVELOPMENT LEVEL OF THE URBAN PLANNING ENVIRONMENT ON THE URBANISED TERRITORIES OF THE ASTRAKHAN REGION	200
<i>Magomed G. Magomedov, Elena I. Pavlyuchenko</i> SYSTEMIC APPROACH TO INTERACTION MANAGEMENT OF PARTICIPANTS OF THE INVESTMENT PROCESS IN CONSTRUCTION.	209
<i>Matvey S. Oborin</i> ANTI-CRISIS MANAGEMENT OF THE RUSSIA'S REGIONAL INDUSTRIAL PRODUCTION UNDER THE CONDITIONS OF SANCTIONS	220
FORMATTING REQUIREMENTS FOR PAPERS	232

Для цитирования: Вагабов Н.М., Курбанов А.З., Магомедова М.А. Проектирование и расчет комбинированного инструмента зенкер-метчик для обработки деталей судовых машин, механизмов и судовой арматуры. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2018;45 (2):8-17. DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-2-8-17

For citation: Vagabov N.M., Kurbanov A.Z., Magomedova M.A. Combined countersink-tap tool for the processing of parts of ship machines, mechanisms and fittings: design and calculations. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2018; 45(2):8-17. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-2-8-17

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ МЕХАНИКА

УДК 621.882.085/.086.004

DOI: 10.21822/2073-6185-2018-45-2-8-17

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ КОМБИНИРОВАННОГО ИНСТРУМЕНТА ЗЕНКЕР-МЕТЧИК ДЛЯ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ СУДОВЫХ МАШИН, МЕХАНИЗМОВ И СУДОВОЙ АРМАТУРЫ

Вагабов Н.М.,¹ Курбанов А.З.,² Магомедова М.А.³

¹Дагестанский государственный технический университет,

¹367026, г. Махачкала, пр. И. Шамиля, 70, Россия,

²⁻³ Дагестанский государственный педагогический университет,

²⁻³367003, г. Махачкала, ул. Ярагского, 57, Россия,

¹e-mail-vagabov01@inbox.ru, ²e-mail-kurbanov-48@mail.ru, ³mag.marina1979@gmail.com.

Резюме: Цель. В связи с повышением требований к качеству металлорежущих инструментов актуализируется вопрос о необходимости пересмотра методов их проектирования и расчета, что и обусловило цель исследования. Проектирование металлорежущих инструментов предусматривает решение ряда вопросов, связанных с их расчетом, конструированием, изготовлением и эксплуатацией. Методы решения этих вопросов всегда находились в зависимости от средств, которым располагал конструктор инструментальщик. **Метод.** Современные электронно-вычислительные машины и компьютерная техника обладают огромными возможностями для совершенствования процесса проектирования инструментов. Для решения данной задачи необходимо создать такие методы расчета, которые были бы аналитическими, имели строгую формализацию всего процесса проектирования, позволяли четко определить критерий оптимизации, были бы в максимальной степени общими и позволяли решать все вопросы проектирования инструмента комплексно, т.е. содержащие методы решения вопросов формообразования поверхностей инструментами, расчета схем резания, прочности режущей части инструментов, их технологичность. **Результат.** Для проектирования и расчета комбинированного инструмента зенкер-метчик разработана блок-схема алгоритма расчета, которая позволяет с помощью заданной программы автоматизировать процесс расчета его основных параметров. **Вывод.** Разработанная блок – схема алгоритма расчета с заданной программой позволяет автоматизировать процесс вычисления основных параметров комбинированного инструмента зенкер-метчик, применяемых для нарезания резьбы в деталях судовых машин, механизмов и судовой арматуры из труднообрабатываемых материалов. Блок – схема может быть также использована и для автоматизации процесса расчета параметров любых режущих инструментов, применяемых для обработки различных материалов.

Ключевые слова: инструмент, блок-схема, алгоритм, точность, деталь, агрегат, автоматизация, программа, механизм, критерий

PHYSICAL-MATEMATICAL SCIENCE
MECHANICS

COMBINED COUNTERSINK-TAP TOOL FOR THE PROCESSING OF PARTS OF SHIP
MACHINES, MECHANISMS AND FITTINGS: DESIGN AND CALCULATIONS

Nurulla M. Vagabov,¹ Ali Z. Kurbanov,² Marina A. Magomedova³

¹Daghestan State Technical University,

¹70 I. Shamilya Ave., Makhachkala 367026, Russia,

²⁻³Daghestan State Pedagogical University,

²⁻³57 Yaragskogo Ave., Makhachkala 367003, Russia,

¹e-mail-vagabov01@inbox.ru, ²e-mail-kurbanov-48@mail.ru, ³mag.marina1979@gmail.com.

Abstract Objectives The aim of the study is to revise design and calculation methods for metal cutting tools due to an increase in their quality requirements. The design of metal cutting tools necessitates finding a solution to a number of issues related to their calculation, construction, manufacture and operation. However, the methods for solving these issues have always been dependent on the means that the toolmaker had at his disposal. **Methods** Contemporary electronic computers and digital equipment offers significant opportunities for improving the process of machine tool design. To solve this problem, it is necessary to generate calculation methods that are sufficiently analytical to be capable of rigorously formalising the entire designing process. They have to support clearly defined optimisation criteria and be of sufficient generality to enable all problems associated with tool design to be solved in a complex manner. That is, these calculation approaches have to support methodologies for solving the problems of the surface shaping by tools, calculating the cutting schemes, as well as the strength and manufacturability of the cutting part. **Results** A flowchart of a calculation algorithm for designing and calculating the combined countersink-tap tool has been developed, allowing the process of calculating its basic parameters to be automated according to a predefined programme. **Conclusion** The developed flowchart of the calculation algorithm with the preset programme allows the process of calculating the basic parameters of the combined countersink-tap tools, used for threading in the parts of ship machines, mechanisms and ship fittings from hard-to-process materials, to be automated. The flowchart can similarly be used to automate the process of calculating the parameters of any cutting tools used to process any materials.

Keywords: tool, flowchart, algorithm, accuracy, detail, assembly, automation, programme, mechanism, criterion

Введение Проектирование металлорежущих инструментов предусматривает решение ряда вопросов, связанных с их расчетом, конструированием, изготовлением и эксплуатацией. Методы решения этих вопросов всегда находились в зависимости от средств, которыми располагал конструктор для проведения расчетов. При отсутствии электронных вычислительных машин и компьютерной техники для расчета инструментов применялись различные приближенные графические, графоаналитические и аналитические методы, которые часто были громоздкими и имели невысокую точность, но были удобны, тем, что не требовали большого количества вычислений. Естественно, что результаты, получаемые при использовании таких приближенных методов, не позволяли спроектировать инструмент с оптимальными значениями его параметров и ограничивали его точность [1-5].

В настоящее время, в связи с повышением требований к качеству металлорежущих инструментов, с одной стороны, и с широким внедрением в промышленность информационно-коммуникационных технологий, а именно ЭВМ и электронно-вычислительных машин, компьютерной техники - с другой, встал вопрос о пересмотре методов проектирования инструментов. Особенно это важно для автоматизации процесса проектирования металлорежущих инструментов [6-11].

Постановка задачи. Современные электронные вычислительные машины и компьютерная техника обладают огромными возможностями для совершенствования процесса проектирования вообще и процесса проектирования металлорежущих инструментов в частности. Они дают возможность с предельной быстротой и точностью решать самые сложные аналитические задачи, осуществлять анализ получаемых результатов, отыскивать оптимальные параметры для конструкции и, в конечном итоге, позволяют полностью автоматизировать весь процесс проектирования. Чтобы использовать эти возможности информационно-коммуникационных технологий для проектирования и проведения расчетов параметров металлорежущих инструментов, необходимо создать такие методы расчета, которые были бы:

- аналитическими, имели строгую формализацию всего процесса проектирования, позволяющие четко определять критерий оптимизации;
- в максимальной степени общими, позволяющими комплексно решать вопросы расчета и проектирования инструмента [1,7-12].

Эта необходимость проявляется при правильной постановке задачи, т.е., при соответствующей формализации и построении алгоритмов. К алгоритму предъявляются требования записи в наглядной и компактной форме, удобной для практического использования.

Авторами в основу создания алгоритмов для данного случая взят способ – запись алгоритма в виде блок-схемы. При этом способе запись алгоритма представляется в виде последовательности прямоугольников - блоков. Каждый блок, по сути дела, соответствует оператору в первом способе изложения алгоритмов. Блоки соединяются стрелками, указывающими связь между различными этапами. Эта форма записи более наглядна и особенно выгодна при наличии разветвляющегося и циклически повторяющегося вычислительного процесса.

Требуется строгая последовательность выполнения. Особенно это важно при проведении расчета и проектирования комбинированных инструментов, которые выполняют разные функции при обработке деталей судовых машин, механизмов и агрегатов, изготовленных из труднообрабатываемых материалов, обладающих прочностью до 700 С⁰, сплавы на никелевой основе – до 1100 С⁰, сплавы на молибденовой и ниобиевой основах – 1500 С⁰, сплавы на вольфрамовой основе – 2000 С⁰.

Известно также, что труднообрабатываемые материалы обладают большой теплостойкостью, коррозионной стойкостью, жаростойкостью, жаропрочностью и высокой прочностью. Широкое применение находят материалы с высокой удельной прочностью. Из труднообрабатываемых материалов к ним в основном относятся сплавы на титановой основе и высокопрочные стали. Стали на титановой основе обладают также высокой коррозионной стойкостью в большинстве агрессивных сред, что обуславливает их большую перспективность. Поэтому разработка обоснованных технологических рекомендаций по выбору рациональных режимов резания и оптимальных конструкций инструмента для различных операций механической обработки заготовок и, что особенно очень важно, для процесса нарезания внутренней резьбы в труднообрабатываемых сталях и сплавах является весьма актуальной задачей.

Немаловажное значение имеет автоматизация самого процесса обработки. В настоящее время все большее применение находят станки с программным управлением, многоцелевые станки, а также переналаживаемые автоматизированные линии и механические комплексы, состоящие из одно- и -много инструментальных станков с ЧПУ. Стоимость автоматизированных станков на порядок и более выше, а автоматизированных линий и комплексов – на два порядка и более выше стоимости универсальных станков. Для эффективной работы станков, линий и комплексов большое значение имеет надежность режущего инструмента.

За критерий оптимизации режимов резания при обработке на автоматизированном оборудовании принимают минимальные приведенные затраты на операцию при безусловном выполнении плана выполняемых работ - выпуска изделий. В связи с этим, при поиске рациональных режимов резания для работы в условиях автоматизированного производства учитывают стоимость работы оборудования, надежность работы инструмента в зависимости от его количества, программу выпуска изделий и возможность обеспечения режущим инструментом. При

многоинструментальной обработке с увеличением числа работающих инструментов растет время простоев станков, линий, комплексов из-за отказов инструментов. Необходимо повысить уровень разработки, проектирования и изготовления режущих инструментов, создать условия автоматизации этого процесса. В связи с этим, авторами разработана блок – схема расчета комбинированного инструмента зенкер-метчик (рис.1) .

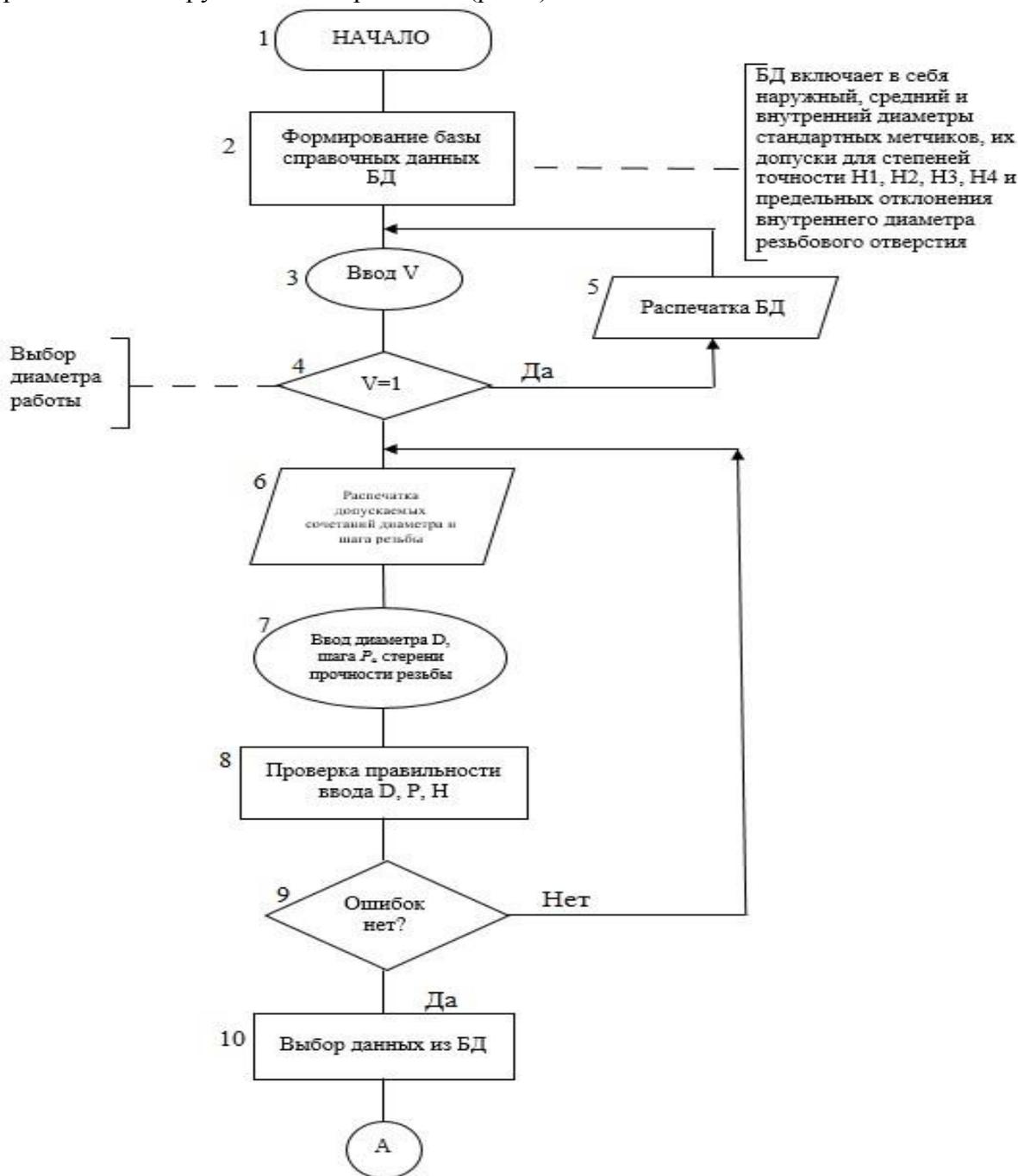


Рис.1. Блок-схема расчета комбинированного инструмента зенкер-метчик

Fig.1. Block diagram of calculation of the combined tool countersink tap

Методы исследования. Процесс проектирования режущего инструмента с помощью ЭВМ возможен только при условии правильной постановки задачи, т.е., при соответствующей формализации и построении алгоритмов. Алгоритм проектирования представляет совокупность последовательно изложенных логических и вычислительных действий. Эта совокупность разбивается на этапы, каждый из которых предназначен для решения определенной задачи всего процесса проектирования. Исходя из выше изложенного, были составлены и апробированы несколько вариантов программ и схем расчета инструментов. Разработанная блок – схема алго-

ритма с заданной программой расчета (рис.2) позволяет определить и рассчитать основные параметры комбинированного инструмента зенкер-метчик с помощью информационно-коммуникационных технологий.

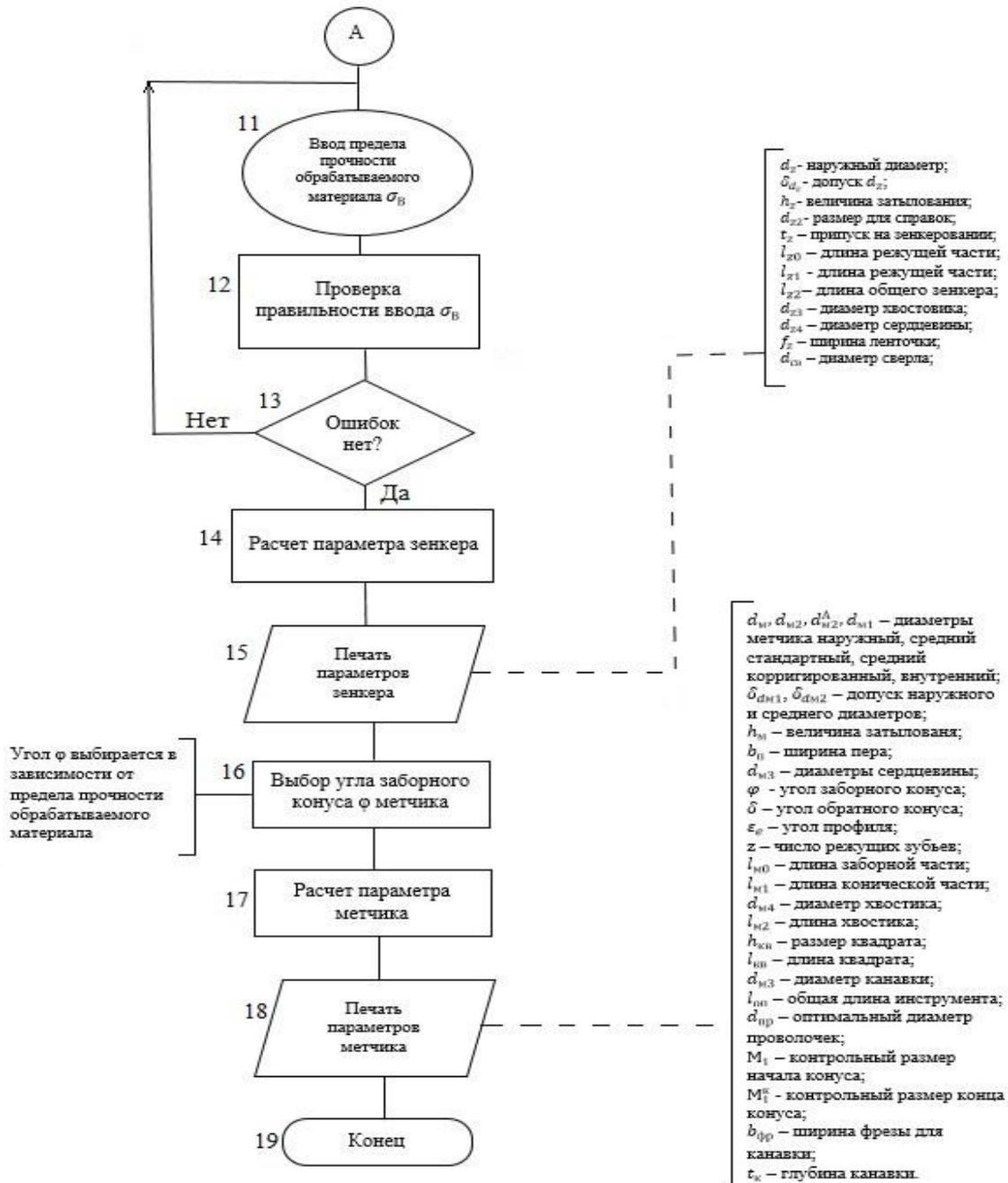


Рис. 2. Блок-схема алгоритма расчета с заданной программой
 Fig. 2. Block diagram of the calculation algorithm with a given program

Обсуждение результатов. Автоматизация процесса расчета и проектирования позволяет ускорить процесс и освободить от тяжелого и громоздкого труда конструкторов и технологов производства, исключить человеческий фактор в процессе расчета и в конечном итоге исключить брак. [11, 19, 21, 24, 28]. Автоматизация расчета и проектирования режущих инструментов в бурный век развития промышленности является востребованностью сегодняшнего дня. Наряду с задачами проектирования режущего инструмента ЭВМ успешно могут быть использованы при решении задач технологии изготовления инструмента, исследования процессов резания и условий эксплуатации режущего инструмента (в первую очередь, для оптимиза-

ции режимов резания), что особенно значимо для обработки резьбовых отверстий малых диаметров в деталях, изготовленных из труднообрабатываемых сталей и сплавов [27].

При резбонарезании в заготовках из наиболее вязких и прочных материалов малых диаметров на метчик действует большой крутящий момент, приводящий к скручиванию метчика, то искажает его геометрические параметры, приводит к ускоренному изнашиванию и поломке метчика. Лучшая работоспособность метчиков малых диаметров из твердых сплавов по сравнению с метчиками из быстрорежущих сталей объясняется их повышенной жесткостью (благодаря свойствам твердого сплава), что препятствует скручиванию и поломкам метчиков.

При нарезании резьбы в заготовках в основном применяют машинно-ручные метчики со шлифованным профилем. Конструктивные элементы и геометрические параметры выбирают в зависимости от вида нарезаемого отверстия и свойств материала заготовки; они должны обеспечить возможно большую прочность и жесткость метчика, наименьшее трение при работе, оптимальную для данного материала толщину среза.

При нарезании резьбы в заготовках из труднообрабатываемых сталей и сплавов иногда применяют метчики с шахматным расположением зубьев и скорректированные метчики, однако трудоемкость изготовления этих метчиков выше, чем метчиков предлагаемых конструкций, кроме того, скорректированные метчики имеют меньшую жесткость.

В работах [5-6,14] представлен комбинированный инструмент зенкер-метчик с новой схемой резания, производственные испытания которого показали его высокую надежность, работоспособность и целесообразность применения для обработки резьбовых отверстий, особенно малых диаметров в труднообрабатываемых материалах [12-14,16,26], используемых для изготовления деталей судового машиностроения, механизмов и судовой арматуры, что способствует повышению уровня механизации и автоматизации производственного процесса, обеспечивая рост производительности труда.

На рис.2 представлена блок – схема алгоритма расчета комбинированного инструмента зенкер – метчик с заданной программой, которые были апробированы в лаборатории информационных технологий факультета технологии и профессионально-педагогического образования Дагестанского государственного педагогического университета, а затем были проверены в реальных производственных условиях в ОАО «Завод им. М. Гаджиева».

На основании приведенных в табл.1 расчетов на ОАО «Завод им. М. Гаджиева» были изготовлены комбинированные инструменты зенкер-метчики.

Реально проведенные производственные испытания на действующем производстве (ОАО «Завод им.М.Гаджиева») показала надежность работы данного инструмента при обработке труднообрабатываемых материалов (нарезание резьбы малых диаметров) с одновременным обеспечением высокого качества выпускаемой продукции.

Поэтому разработка и проектирование инструмента с использованием ЭВМ и ИКТ, обеспечивающие высокое качество работы и автоматизацию процесса, являются главным фактором, обеспечивающим решение практических задач в данном направлении [28-30].

Ниже представлено решение задачи по расчету и проектированию режущего инструмента зенкер-метчик с новой схемой резания, используемой в реальном производстве для обработки детали корпуса насоса УМ86. Материал 12Х1ВН10Т, $\delta_b=600-800$ МПа, степень точности зенкер-метчика Н1, резьба М12 с шагом 1,50 мм, степень точности 4Н. Результаты расчета представлены в табл.1.

Таблица 1. Основные параметры расчёта комбинированного инструмента зенкер-метчик
Table 1. The main parameters of the calculation of the combined tool countersink-tap

Параметры метчика	Параметры зенкера	Справочные размеры
Наружный диаметр $D (M) = 12,133 \text{ мм}$	Наружный диаметр $D (Z) = 10,5 \text{ мм}$	Оптимальный диаметр проволочек $R1 = 1,424 \text{ мм}$
Допуск диаметра $D (M) 0,6 = -0,073 \text{ мм}$	Допуск диаметра $D (Z) 0,1 = 0,047 \text{ мм}$	Длина передней фаски $F1 = 15 \text{ мм}$
Стандартный средний диаметр $D (M) 2 = 11,071 \text{ мм}$	Величина затылования $H (Z) = 0,6 \text{ мм}$	Длина задней фаски $F2 = 13 \text{ мм}$
Средний диаметр $D (M) 2 = 11,096 \text{ мм}$	Размер для справок $D (Z) 2 = 9,9 \text{ мм}$	Величина перекрытия $C = 0,4 \text{ мм}$
Допуск диаметра $D (M) 2,04 = -0,030 \text{ мм}$	Припуск на зенкерование $Z = 0,3 \text{ мм}$	Размер $M1$ у конца корпуса $M1 = 13,172 \text{ мм}$
Внутренний диаметр $D (M) 1 = 10,286 \text{ мм}$	Длина режущей части $LO (Z) = 0,6 \text{ мм}$	Ширина фрезы для канавки $S = 9,0 \text{ мм}$
Ширина пера $P1 = 3,9 \text{ мм}$	Длина рабочей части $LI (Z) = 8 \text{ мм}$	Глубина канавки $RZ = 3,8 \text{ мм}$
Величина затылования $H (M) = 1,3 \text{ мм}$	Общая длина зенкера $L2 (Z) = 16 \text{ мм}$	Оптимальный диаметр проволо- чек $R1 = 1,424 \text{ мм}$
Диаметр сердцевин $D (M) 3 = 4,9 \text{ мм}$		Длина передней фаски $F1 = 15 \text{ мм}$
Угол заборного конуса $\phi 1 = 9 \text{ град.}$		Длина задней фаски $F2 = 13 \text{ мм}$
Угол обратного конуса $05 = 1 \text{ град.} 5 \text{ мин.}$		Величина перекрытия $C = 0,4 \text{ мм}$
Угол профиля $E1 = 27 \text{ град.} 30 \text{ мин.}$		Размер $M1$ у конца корпуса $M1 = 13,172 \text{ мм}$
Угол профиля $E2 = 27 \text{ град.} 3 \text{ мин.}$		Ширина фрезы для канавки $S = 9,0 \text{ мм}$
Число режущих зубьев $Z = 10$		Глубина канавки $RZ = 3,8 \text{ мм}$
Длина заборной части $L0 (M) = 5,155 \text{ мм}$		Оптимальный диаметр про- волочек $R1 = 1,424 \text{ мм}$
Длина конической части $L1 (M) = 8 \text{ мм}$		Длина передней фаски $F1 = 15 \text{ мм}$
Диаметр хвостовика $D (M) 4 = 10 \text{ мм}$		Длина задней фаски $F2 = 13 \text{ мм}$
Длина хвостовика $L (M) 2 = 60 \text{ мм}$		Величина перекрытия $C = 0,4 \text{ мм}$
Размер квадрата $H4 = 8 \text{ мм}$		
Длина квадрата $L (M) 4 = 12 \text{ мм}$		
Диаметр шейки $D (M) 5 = 8 \text{ мм}$		
Общая длина инструмента $L (M) 5 = 80 \text{ мм}$		
Длина до стыка $L (M) 6 = 34 \text{ мм}$		

Вывод. Разработанная блок – схема алгоритма расчета с заданной программой позволяет автоматизировать процесс вычисления основных параметров комбинированного инструмента зенкер-метчик, применяемых для нарезания резьбы в деталях судовых машин, механизмов и судовой арматуры из труднообрабатываемых материалов. Предложенная блок–схема алгоритма расчета может быть также использована и для автоматизации процесса расчета параметров любых режущих инструментов применяемых для обработки любых материалов, что является очень важным моментом.

Библиографический список:

1. Абдуллаев А.В., Курбанов А.З., Хаппалаев А.Ю. Технология конструирования стальных приспособлений и технологического оборудования. Махачкала, ООО «Деловой мир», 2003 – 128с.
2. Базаров Б.М. Расчет точности машин на ЭВМ. М., машиностроение, 2004 – 256с.
3. Броштин И.Н., Семедяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов: учебное пособие. Спб.: Издательство «Лань», 2009- 68с.
4. Волынчев А.З. Исследование работоспособности бесканавочных метчиков при нарезании резьбы в нержавеющей и жаропрочных материалах. Дис.кан.тех.наук. Пермь, 1970.
5. Грувер М.З. САПР и автоматическое проектирование. М.: НИР, 2007 – 125с.
6. Дихтярь Ф.С., Курбанов З.А., Метчик для нарезания резьбы в труднообрабатываемых материалах. В сб.труды НХИ, Николаев, 1978, вып. 134, с 31-33.
7. Дыков А.Т. Ясинский Г.И. Прогрессивный режущий инструмент в машиностроении. М.: Машиностроение, 2005 – 223с.
8. Жарликов Н.В. Комбинированные режущие инструменты. М.Екатеринбург. (Уралсибирское отделение), 2001-145с.
9. Захаров В.В. Метчики для изготовления точных резьб. Прогрессивные процессы машиностроения. Междуведомств. Научн. Трудов. Волгоград, 2002,с. 168-173.
10. Коноплев В.Н., Урлапов В.Г. Метчик для образования резьбы в вязких материалах. А.С. №213547 В 23д. Бюллетень изобретений и открытий, 1968, №10.
11. Корсак В.С., Капустин Н.М. Автоматизация проектирование технологических процессов в машиностроении. – М.: Машиностроение, 2005 – 320с.
12. Курбанов А.З., Абдуллаев А.В. Метчик. А.С.№1618535 от 08.09.90г.
13. Курбанов А.З., Тынянский В.П. Комбинированный метчик// Машиностроение. 1984. №5 с45-157.
14. Курбанов А.З. Высокопроизводительное нарезание внутренних резьб, в труднообрабатываемых материалах. Монография //Махачкала, ООО «Деловой мир», 2004- 108с.
15. Курбанов А.З. Научное обоснование прогрессивных технологий нарезания резьб в деталях из труднообрабатываемых материалов. Монография// Махачкала, ООО «Деловой мир», 2012-108с.
16. Курбанов А.З. Технология нарезания точных резьб в труднообрабатываемых материалах (комбинированный инструмент зенкер-метчик) // Махачкала, 2015.-104с.
17. Лашнёв С.И., Юликов М.И. Расчет и конструирование металлорежущих инструментов с применением ЭВМ, М., «Машиностроение», 1975.-390с.
18. Матвеев В.В. Нарезание точных резьб. – М.: Машиностроение, 1978. – 116с.
19. Монтгомери Д.К. Планирование эксперимента и анализа данных/Пер. с англ. – Л.Судостроение, 1980 – 384с.
20. Налымов В.В. Теория эксперимента. – М.: Наука, 1971 – 157с.
21. Падураев В.Н. Резание труднообрабатываемых материалов. М., Высшая школа, 2008-259с.
22. Рыжков В.А., Ямников А.С. Рациональные конструкции резьбонарезных инструментов и технология их изготовления. Прогрессивные технологии в индустриальном производстве. М., ВНИИ, 1979., с 121 – 125.
23. Таурит Г.Э., Пуховский Е.С., Добрянский С.С. Прогрессивный процесс резьбоформирования. Киев, 1974 – 233.
24. Цветков В.Д. Системно – структурное моделирование и автоматическое проектирование ТП. Минск издательство «Наука». 2007 – 302с.
25. Четвериков С.С. Материалорежущие инструменты (проектирование и производство).-М.:, Высшая школа, 1995-730с.
26. Шатин В.П., Шатин Ю.В., Справочник конструктора инструментальщика. М., Машиностроение, 1975 – 456с.
27. Вагабов Н.М., Курбанов А.З. Обоснование и разработка зенкер-метчика с новой схемой резания // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. - 2013. №3. С. 24-30.
28. Курбанов А.З. Обоснование и разработка новой технологии нарезания резьб в деталях судовых механизмов, изготовленных из спецматериалов. Автореферат дис. ... канд. технич. наук. - Ленинград, 1987. - 20с.

References:

1. Abdullaev A.V., Kurbanov A.Z., Khappalaev A.Yu. Tekhnologiya konstruirovaniya stal'nykh prisposoblenii i tekhnologicheskogo oborudovaniya. Makhachkala: Delovoi mir; 2003. 128 s. [Abdullaev A.V., Kurbanov A.Z., Khappalaev A.Yu. Technology of construction of steel appliances and technological equipment. Makhachkala: Delovoi mir; 2003. 128 p. (in Russ.)]
2. Bazarov B.M. Raschet tochnosti mashin na EVM. M.: Mashinostroenie; 2004. 256s. [Bazarov B.M. Calculation of the machine accuracy using a computer. M.:Mashinostroenie; 2004. 256 p.(in Russ.)]
3. Bronshtein I.N., Semendyaev K.A. Spravochnik po matematike dlya inzhenerov i uchashchikhsya vtuzov: uchebnoe posobie. Spb.: Izdatel'stvo "Lan"; 2009. 68s. [Bronshtein I.N., Semendyaev K.A. A reference book on mathematics for engineers and students of technical institutions: a tutorial. Spb.: Lan'; 2009. 68 p. (in Russ.)]
4. Volynchev A.Z. Issledovanie rabotosposobnosti beskanavochnykh metchikov pri narezanii rez'by v nerzhavayushchikh i zharoprochnykh materialakh. Dis.kan.tekh.nauk. Perm',1970. [Volynchev A.Z. The study of the performance of fluteless taps while threading in stainless and heat-resistant materials. . Candidate of technical sciences thesis. Perm',1970.(in Russ.)]
5. Gruver M.Z. SAPR i avtomaticheskoe proektirovanie. M.: MIR; 2007. 125s. [Gruver M.Z. CAD and automatic design. M.: MIR; 2007. 125 p.(in Russ.)]
6. Dikhtyar F.S., Kurbanov Z.A. Metchik dlya narezaniya rez'by v trudnoobrabatyvaemykh materialakh. Sb.trudov NKHl, Nikolaev.1978;134:31-33. [Dikhtyar' F.S., Kurbanov Z.A. Taps for threading in hard-to-work materials. Collection of works of NUOS, Nikolaev.1978;134:31-33.(in Russ.)]
7. Dykov A.T. Yasinskii G.I. Progressivnyi rezhushchii instrument v mashinostroenii. M.: Mashinostroenie; 2005. 223s. [Dykov A.T. Yasinskii G.I.Progressive cutting tools in mechanical engineering. M.: Mashinostroenie; 2005. 223 p. (in Russ.)]
8. Zharlikov N.V. Kombinirovannye rezhushchie instrumenty. Ekaterinburg. 2001. 145s. [Zharlikov N.V. Combined cutting tools. Ekaterinburg. 2001. 145 p.(in Russ.)]
9. Zakharov V.V. Metchiki dlya izgotovleniya tochnykh rez'b. Progressivnye protsessy mashinostroeniya. Mezhdudedomstv. Sb. Nauchn. Trudov. Volgograd; 2002. S. 168-173. [Zakharov V.V. Taps for the manufacture of fine threads. Progressive processes of machine building. Interdepartmental collection of scientific works. Volgograd; 2002. P. 168-173.(in Russ.)]
10. Konoplev V.N., Uralpov V.G. Metchik dlya obrazovaniya rez'by v vyazkikh materialakh. AS №213547 V 23d. Byulleten' izobretenii i otkrytii. 1968; 10. [Konoplev V.N., Uralpov V.G. Tap for forming threads in viscous materials. AS №213547 V 23d. Bulletin of inventions and discoveries. 1968;10.(in Russ.)]
11. Korsak V.S., Kapustin N.M. Avtomatizatsiya proektirovaniya tekhnologicheskikh protsessov v mashinostroenii. M.: Mashinostroenie; 2005. 320s. [Korsak V.S., Kapustin N.M. Automation of the design of technological processes in mechanical engineering. M.: Mashinostroenie; 2005. 320 p. (in Russ.)]
12. Kurbanov A.Z. Abdullaev A.V. Metchik dlya obrabotki trudno-obrabatyvaemykh materialov. Avtorskoe svidetel'stvo №1618535 ot 08.09.1990 g. [Kurbanov A.Z. Abdullaev A.V. Tap for processing difficult-to-process materials. Author's certificate №1618535 from 08.09.1990 (in Russ.)]
13. Kurbanov A.Z., Tynyanskii V.P. Kombinirovannyi metchik. Mashinostroenie. 1984;5:45-157. [Kurbanov A.Z., Tynyanskii V.P. Combined tap. Mashinostroenie. 1984;5:45-157. (in Russ.)]
14. Kurbanov A.Z. Vysokoproizvoditel'noe narezanie vnutrennikh rez'b v trudno-obrabatyvaemykh materialakh. Monografiya. Makhachkala: Delovoi mir; 2004.108 s. [Kurbanov A.Z. High-performance tapping of internal threads in hard-to-process materials. Monograph. Makhachkala: OAO "Delovoi mir"; 2004.108 p. (in Russ.)]
15. Kurbanov A.Z. Nauchnoe obosnovanie progressivnykh tekhnologii narezaniya rez'b v detalyakh iz trudnoobrabatyvaemykh materialov. Makhachkala: Delovoi mir; 2012. 108 s. [Kurbanov A.Z. Scientific substantiation of progressive technologies of threading in details from hard-to-process materials. Makhachkala: Delovoi mir; 2012. 108 p. (in Russ.)]
16. Kurbanov A.Z. i dr. Tekhnologiya narezaniya tochnykh rez'b v trudnoobrabatyvaemykh materialakh (kombinirovannyi instrument zenker-metchik). Monografiya. Makhachkala; 2015. 104 s. [Kurbanov A.Z. et al. The technology of tapping precise threads in hard-to-process materials (combined counter-sink-tap tool). Monograph. Makhachkala; 2015. 104 p. (in Russ.)]
17. Lashnev S.I., Yulikov M.I. Raschet i konstruirovaniye metallorezhushchikh instrumentov s primeneniem EVM. M.: Mashinostroenie; 1975. 390 s. [Lashnev S.I., Yulikov M.I. Computer-assisted calculation and design of metal-cutting tools. M.: Mashinostroenie; 1975. 390 p. (in Russ.)]

18. Matveev V.V. Narezanie tochnykh rez'b. M.: Mashinostroenie; 1978. 116 s. [Matveev V.V. Accurate thread cutting. M.: Mashinostroenie; 1978. 116 p. (in Russ.)]
19. Montgomeri D.K. Planirovanie eksperimenta i analiza dannykh. L. Sudostroenie; 1980. 384 s. [Montgomery D.K. Planning of experiment and data analysis. L. Sudostroenie; 1980. 384 p. (in Russ.)]
20. Nalimov V.V. Teoriya eksperimenta. M.: Nauka; 1971. 157 s. [Nalimov V.V. The theory of experiment. M.: Nauka; 1971. 157 p. (in Russ.)]
21. Poduraev V.N. Rezanie trudnoobrabatyvaemykh materialov. M.: Vysshaya shkola; 2008. 259 s. [Poduraev V.N. Cutting hard-to-work materials. M.: Vysshaya shkola; 2008. 259 p. (in Russ.)]
22. Ryzhenkov V.A., Yamnikov A.S. Ratsional'nye konstruksii rez'bonareznykh instrumentov i tekhnologiya ikh izgotovleniya. Progressivnye tekhnologii v industrial'nom proizvodstve. M.: VNSh; 1979. P. 121 – 125. [Ryzhenkov V.A., Yamnikov A.S. Rational designs of thread-cutting tools and technology of their manufacture. Progressive technologies in industrial production. M.: VNSh; 1979. P. 121 – 125. (in Russ.)]
23. Taurit G.E., Pukhovskii E.S., Dobryanskii S.S. Progressivnyi protsess rez'boformirovaniya. Kiev; 1974. 233 s. [Taurit G.E., Pukhovskii E.S., Dobryanskii S.S. Progressive process of thread formation. Kiev; 1974. 233 p. (in Russ.)]
24. Tsvetkov V.D. Sistemno – strukturnoe modelirovanie i avtomaticheskoe proektirovanie TP. Minsk: Nauka; 2007. 302s. [Tsvetkov V.D. System - structural modeling and automatic design of TP. Minsk: Nauka; 2007. 302 s. (in Russ.)]
25. Chetverikov S.S. Materialorezhushchie instrumenty (proektirovanie i proizvodstvo). M.: Vysshaya shkola; 1995. 730s. [Chetverikov S.S. Material-cutting tools (design and production). M.: Vysshaya shkola; 1995. 730 p. (in Russ.)]
26. Shatin V.P., Shatin Yu.V. Spravochnik konstruktora instrumental'shchika. M.: Mashinostroenie; 1975. 456s. [Shatin V.P., Shatin Yu.V. Handbook of the designer - toolmaker. M.: Mashinostroenie; 1975. 456 p. (in Russ.)]
27. Vagabov N.M., Kurbanov A.Z. Obosnovanie i razrabotka zenker-metchika s novoi skhemoi rezaniya. Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskije nauki. 2013;30(3):24-30. [Vagabov N.M., Kurbanov A.Z. Explanation and development of combined tool core drill tap with the new cutting scheme. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2013;30(3):24-30. (In Russ.)]
28. Kurbanov A.Z. Obosnovanie progressivnoi tekhnologii narezaniya rez'b v detalyakh iz trudnoobrabatyvaemykh materialov. Avtoreferat dissertatsii na soiskanie stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk. Leningrad; 1987. 20 s. [Kurbanov A.Z. Substantiation of the progressive technology of threading in details from hard-to-process materials. Published summary of the candidate of technical sciences dissertation. Leningrad; 1987. 20 p. (in Russ.)]

Сведения об авторах:

Вагабов Нурулла Магомедович – кандидат технических наук, старший преподаватель.

Курбанов Али Зульпукарович – кандидат технических наук, профессор.

Магомедова Марина Алиевна – кандидат педагогических наук, старший преподаватель.

Information about the authors.

Nurulla M. Vagabov – Cand. Sci. (Technical), Senior Lecturer.

Ali Z. Kurbanov – Cand. Sci. (Technical), Prof.

Marina A. Magomedova – Cand. Sci. (Pedagogical), Senior Lecturer.

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 30.03.2018.

Принята в печать 08.05.2018.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 30.03.2018.

Accepted for publication 08.05.2018.

Для цитирования: *Иванычев Д.А. Метод граничных состояний в задачах механики для анизотропных тонких плит. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2018;45(2):18-30. DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-2-18-30*

For citation: *Ivanychev D.A. Edge state method in mechanics problems concerning anisotropic thin plates. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2018;45(2):18-30. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-2-18-30*

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ МЕХАНИКА

УДК 539.3

DOI: 10.21822/2073-6185-2018-45-2-18-30

МЕТОД ГРАНИЧНЫХ СОСТОЯНИЙ В ЗАДАЧАХ МЕХАНИКИ ДЛЯ АНИЗОТРОПНЫХ ТОНКИХ ПЛИТ

Иванычев Д.А.

Липецкий государственный технический университет,
398600, Московская ул., 30, Липецк, Россия,
e-mail: lsivdml@mail.ru

Резюме. Цель. Целью работы является развитие метода граничных состояний на класс задач изгиба и кручения анизотропных тонких плит; разработка теории построения базисов пространств внутренних и граничных состояний, основываясь на общем приближенном решении задачи изгиба пластинок и формирование соотношений, определяющих искомое упругое состояние; реализация разработанной теории в решении конкретных задач. **Метод.** Выполнение поставленных задач предполагается средствами метода граничных состояний. Базисы пространств состояний, составляющих основу метода, формируются согласно фундаментальной системе многочленов Вейерштрасса. **Результат.** Доказан изоморфизм пространств внутренних и граничных состояний, позволяющий взаимно однозначно установить соответствие между элементами этих пространств. Изоморфизм пространств позволяет процесс поиска внутреннего состояния свести к изучению изоморфного ему граничного состояния. Механические характеристики представлены в виде рядов Фурье. В случае первой и второй основных задач механики в качестве коэффициентов Фурье выступают скалярные произведения, имеющие энергетический смысл: в пространстве граничных состояний – это работа внешних сил; в пространстве внутренних состояний – это внутренняя энергия упругого деформирования. В случае смешанных задач механики отыскание упругого состояния, в терминах метода граничных состояний, сводится к решению бесконечной системы алгебраических уравнений. **Вывод.** Приведено решение тестовой первой основной задачи изгиба с кручением для прямоугольной пластины из стеклопластика с соответствующими выводами, задачи кручения для пластинки нетривиальной формы, даны комментарии о необоснованности решения второй основной задачи, а также задачи со смешанными граничными условиями для прямоугольной пластинки, где на одной грани заданы одновременно скручивающие и изгибающие усилия, а противоположная грань закреплена. Представлены явные и косвенные признаки сходимости решения задач и графическая визуализация результатов.

Ключевые слова: граничные состояния, анизотропные пластины, изгиб с кручением, задача кручения, упругое состояние

PHYSICAL-MATEMATICAL SCIENCE
MECHANICS

Dmitriy A. Ivanychev

Lipetsk State Technical University,
30 Moskovskaya Str., Lipetsk 398600, Russia,
e-mail: lsivdmal@mail.ru

EDGE STATE METHOD IN MECHANICS PROBLEMS CONCERNING
ANISOTROPIC THIN PLATES

Abstract Objectives The aims of the study are to expand the edge state method for solving bending and torsion problems concerning anisotropic thin plates, develop the theory of construction of the bases of spaces of interior and edge states based on a general approximate solution to the plate bending problem, formulate the relationships determining the desired elastic state and implement the developed theory in solving specific problems. **Methods** The fulfilment of the tasks is assumed to be based on the edge state method. The state spaces comprising the methodological basis are formed according to the fundamental system of Weierstrass polynomials. **Results** An isomorphism of interior and edge state spaces is demonstrated, allowing a correspondence between the elements of these spaces to be unambiguously established. The isomorphism of spaces allows the process of finding the internal state to be reduced to the study of the edge state isomorphic to it. The mechanical characteristics are represented in the form of a Fourier series. In the case of the first and second fundamental mechanics problems, the Fourier coefficients are represented by scalar products having an energy implication: in the space of edge states, this consists in the work of external forces; in the space of internal states, it is the internal energy of elastic deformation. In the case of mixed mechanical problems, the search for an elastic state in the terms of the edge state method is reduced to solving an infinite system of algebraic equations. **Conclusion** The solution of the first-tested basic problem of bending with torsion for a rectangular fibreglass plate with corresponding conclusions is given, as well as the problems of torsion for a plate of nontrivial form. Commentary is provided concerning the unreasonableness of the solution of the second fundamental problem, as well as the problem with mixed boundary conditions for a rectangular plate where twisting and bending forces are defined simultaneously on the one face, while the opposite face is squeezed. Both explicit and indirect signs of the convergence of the solution to the problem are presented along with a graphical visualisation of the results.

Keywords: edge states, anisotropic plates, bending with torsion, torsion problem, elastic state

Введение. В настоящее время приближенная теория изгиба пластин с разной степенью анизотропии, основанная на гипотезах Кирхгофа-Лява, хорошо изучена. Исследования по теории изгиба тонких пластин связаны с работами Амбарцумяна С.А., Артюхина Ю.П., Бережницкого Л.Т., Williams M.L., Грилицкого Д.В., Isida M., Калоерова С.А., Лехницкого С.Г., Линькова А.М., Пелеха Б. Л., Максименко В.Н., Подружина Е.Г., Попова Г.Я., Прусова И.А., Reissner E., Tamate O., Тимошенко С.П., Фильштинского Л.А., Hasebe N. и др. Однако приближенность основных гипотез создает определенные трудности при численной реализации задач изгиба. Особенностью традиционных методов расчета можно отнести отсутствие универсального подхода при решении задач, большой объем вычислительных операций, большую размерность разрешающей системы уравнений.

Не смотря на все это, численным методам решения задач изгиба уделено значительное внимание в ряде работ. Например, в работе [14] рассматривается двумерная краевая задача статического поперечного изгиба тонкой прямоугольной пластинки из анизотропного материала. Прогибы пластинки определялись модифицированным методом сплайн-коллокации, сводящего к краевой задаче для системы обыкновенных дифференциальных уравнений. В работе [19] приводится методика численного определения напряженно-деформированного состояния изгибаемой тонкой ортотропной пластинки при нетрадиционных способах закрепления ее краев. На основе технической теории изгиба тонких анизотропных пластин строятся представления фун-

даментальных решений для ортотропных, пластин, имеющих каноническую форму [13]. В работе [20] построены комплексные потенциалы и интегральные представления для определения напряженно-деформированного состояния при изгибе анизотропных пластин имеющих дефекты типа трещин, отверстий и содержащих абсолютно жесткие криволинейные стержни и двумерные жесткие шайбы. Ряд работ посвящен изгибу многосвязных анизотропных пластин [8,12,18]. В настоящей работе предлагается совершенствование нового энергетического метода граничных состояний на класс задач изгиба и кручения анизотропных тонких плит.

Постановка задачи. Рассматривается упругое равновесие тонкой плиты, толщина которой мала по сравнению с другими размерами и испытывающая малые, по сравнению с толщиной, деформации (не превышающие толщины).

Такие плиты еще называют пластинками. Плоская пластинка деформируется нагрузками, распределенными по краю и приводящими к скручивающим моментам; последние, могут быть как заданными, так и реактивными, возникающие в местах закреплений (рис. 1). Пластинка толщиной h в каждой точке имеет одну плоскость упругой симметрии, параллельную срединной плоскости. Объемные силы отсутствуют [1].

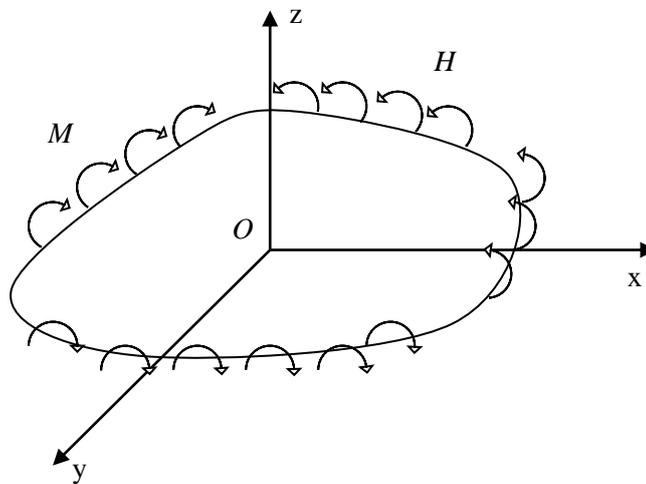


Рис. 1. Анизотропная пластинка
Fig. 1. Anisotropic plate

Приближенная теория задачи изгиба и кручения анизотропных пластин (тонких плит) рассмотрена С.Г. Лехницким [9]. Перемещения точек пластинки u и v определяются через функцию прогиба срединной плоскости $w(x, y)$ определяющей форму изогнутой срединной поверхности.

$$u = -z \frac{\partial w}{\partial x}; \quad v = -z \frac{\partial w}{\partial y}; \quad (1)$$

$$\varepsilon_{xx} = -z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}; \quad \varepsilon_{yy} = -z \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}; \quad \gamma_{xy} = -2z \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}.$$

Обобщенный закон Гука имеет вид (компонента σ_{zz} пренебрегается):

$$\begin{aligned} \varepsilon_{xx} &= a_{11}\sigma_{xx} + a_{12}\sigma_{yy} + a_{16}\tau_{xy}; \\ \varepsilon_{yy} &= a_{12}\sigma_{xx} + a_{22}\sigma_{yy} + a_{26}\tau_{xy}; \\ \gamma_{xy} &= a_{16}\sigma_{xx} + a_{26}\sigma_{yy} + a_{66}\tau_{xy}, \end{aligned} \quad (2)$$

где a_{ij} – упругие параметры среды [11].

Уравнение прогибов анизотропной пластинки:

$$D_{11} \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 4D_{16} \frac{\partial^4 w}{\partial x^3 \partial y} + 2(D_{12} + 2D_{66}) \frac{\partial^4 w}{\partial x^3 \partial y^2} + 4D_{26} \frac{\partial^4 w}{\partial x \partial y^3} + D_{22} \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = 0. \quad (3)$$

Общее решение задачи, выражающее компоненты тензора напряжений и вектора пере-

мещений через две комплексные переменные, сопряженные аффинными преобразованиями имеет вид:

$$\begin{aligned}
 w &= 2\operatorname{Re}[w_1(z_1) + w_2(z_2)]; \\
 M_x &= -2\operatorname{Re}[p_1 w_1''(z_1) + p_2 w_2''(z_2)]; \\
 M_y &= -2\operatorname{Re}[q_1 w_1''(z_1) + q_2 w_2''(z_2)]; \\
 H_{xy} &= H_{yx} = -2\operatorname{Re}[r_1 w_1''(z_1) + r_2 w_2''(z_2)]; \\
 N_x &= -2\operatorname{Re}[\mu_1 s_1 w_1'''(z_1) + \mu_2 s_2 w_2'''(z_2)]; \\
 N_y &= 2\operatorname{Re}[s_1 w_1'''(z_1) + s_2 w_2'''(z_2)]; \\
 \sigma_{xx} &= \frac{12M_x}{h^3} z; \sigma_{yy} = \frac{12M_y}{h^3} z; \tau_{xy} = \frac{12H_{xy}}{h^3}; \\
 \tau_{xz} &= \frac{6N_x}{h^3} \left(\frac{h^2}{4} - z^2 \right); \tau_{yz} = \frac{6N_y}{h^3} \left(\frac{h^2}{4} - z^2 \right),
 \end{aligned} \tag{4}$$

где M_x , M_y – изгибающие моменты; H_{xy} , H_{yx} – скручивающие моменты; N_x , N_y – перерезывающие силы; p_i , q_i , r_i – константы, определяемые параметрами анизотропии a_{ij} .

Функции $w_i(z_i)$ – аналитические по своим переменным; $z_1 = x + \mu_1 y$, $z_2 = x + \mu_2 y$ – обобщенные комплексные переменные; μ_1 , μ_2 , $\bar{\mu}_1$, $\bar{\mu}_2$ – комплексные корни векового уравнения:

$$D_{22}\mu^4 + 4D_{26}\mu^3 + 2(D_{12} + 2D_{66})\mu^2 + 4D_{16}\mu + D_{11} = 0, \tag{5}$$

где D_{ij} – жесткости анизотропной пластинки.

$$\begin{aligned}
 D_{ij} &= B_{ij} \frac{h^3}{12}; \\
 B_{11} &= \frac{1}{\Delta} (a_{22}a_{66} - a_{26}^2); B_{22} = \frac{1}{\Delta} (a_{11}a_{66} - a_{16}^2); B_{12} = \frac{1}{\Delta} (a_{16}a_{26} - a_{12}a_{66}); \\
 B_{66} &= \frac{1}{\Delta} (a_{11}a_{22} - a_{12}^2); B_{16} = \frac{1}{\Delta} (a_{12}a_{26} - a_{22}a_{16}); B_{26} = \frac{1}{\Delta} (a_{12}a_{16} - a_{11}a_{26}); \\
 \Delta &= \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{16} \\ a_{12} & a_{22} & a_{26} \\ a_{16} & a_{26} & a_{66} \end{vmatrix}.
 \end{aligned} \tag{6}$$

Уравнения равновесия имеют вид:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} &= 0; \\
 \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z} &= 0.
 \end{aligned} \tag{7}$$

Интегральные значения моментов и перерезывающих сил:

$$\begin{aligned}
 M_x &= \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_{xx} z dz; M_y = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_{yy} z dz; H_{xy} = H_{yx} = \int_{-h/2}^{h/2} \tau_{xy} z dz; \\
 N_x &= \int_{-h/2}^{h/2} \tau_{zx} dz; N_y = \int_{-h/2}^{h/2} \tau_{zy} dz.
 \end{aligned} \tag{8}$$

Целью работы является построение аналитического решения для однородной анизотропной пластинки. Ее достижению отвечает система взаимосвязанных процедур: корректная

постановка, обезразмеривание, выбор метода решения, верификация полученных результатов, графическая иллюстрация.

Методы исследования. Для решения основных задач механики в теории изгиба анизотропных пластин предлагается метод граничных состояний (МГС). Метод граничных состояний [15] является энергетическим методом решения краевых задач уравнений математической физики. Его фундамент составляют пространства внутренних Ξ и граничных Γ состояний:

$$\Xi = \{\xi_1, \xi_2, \xi_3, \dots, \xi_k, \dots\}; \Gamma = \{\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \dots, \gamma_k, \dots\}.$$

Внутреннее состояние определяется наборами компонент вектора перемещений, теноров деформаций и напряжений:

$$\xi_k = \{u_i^k, \varepsilon_{ij}^k, \sigma_{ij}^k\}. \quad (9)$$

Основную сложность формирования решения в МГС является конструирование базиса внутренних состояний, который опирается на общее или фундаментальное решение для среды; также возможно использование каких-либо частных или специальных решений. Скалярное произведение в пространстве Ξ внутренних состояний выражается через внутреннюю энергию упругого деформирования (отсюда и принадлежность метода к классу энергетических). Например, для 1-го и 2-го внутреннего состояния пластинки, занимаемой область D :

$$(\xi_1, \xi_2) = \int_D \varepsilon_{ij}^1 \sigma_{ij}^2 ds, \quad (10)$$

причем в силу коммутативности состояний среды:

$$(\xi_1, \xi_2) = (\xi_2, \xi_1) = \int_D \varepsilon_{ij}^1 \sigma_{ij}^2 ds = \int_D \varepsilon_{ij}^2 \sigma_{ij}^1 ds.$$

Граничное состояние определяется компонентами вектора перемещения точек границы и поверхностных усилий:

$$\gamma_k = \{u_i^k, p_i^k\}, \quad p_i^k = \sigma_{ij}^k n_j, \quad (11)$$

где n_j – компонента нормали к границе.

В пространстве граничных состояний Γ скалярное произведение выражает работу внешних сил по поверхности тела ∂D , например для 1-го и 2-го состояния:

$$(\gamma_1, \gamma_2) = \int_{\partial D} p_i^1 u_i^2 dl,$$

причем в силу принципа возможных перемещений:

$$(\gamma_1, \gamma_2) = (\gamma_2, \gamma_1) = \int_{\partial D} p_i^1 u_i^2 dl = \int_{\partial D} p_i^2 u_i^1 dl.$$

Доказано, что в случае гладкой границы оба пространства состояний являются гильбертовыми и сопряжены изоморфизмом [16]. По определению, каждому элементу $\xi_k \in \Xi$ соответствует единственный элемент $\gamma_k \in \Gamma$, причем это соответствие взаимно-однозначное: $\xi_k \leftrightarrow \gamma_k$. Это позволяет отыскание внутреннего состояния свести к построению изоморфного ему граничного состояния. Последнее существенно зависит от краевых условий. В случае первой и второй основной задачи механики проблема сводится к разрешающей системе уравнений относительно коэффициентов Фурье, разложения искомого внутреннего ξ и граничного γ состояний в ряд по элементам ортонормированного базиса:

$$\xi = \sum_{k=1}^{\infty} c_k \xi_k; \quad \gamma = \sum_{k=1}^{\infty} c_k \gamma_k$$

или в явном виде:

$$p_i = \sum_{k=1}^{\infty} c_k p_i^k; \quad u_i = \sum_{k=1}^{\infty} c_k u_i^k; \quad \sigma_{ij} = \sum_{k=1}^{\infty} c_k \sigma_{ij}^k; \quad \varepsilon_{ij} = \sum_{k=1}^{\infty} c_k \varepsilon_{ij}^k. \quad (12)$$

Коэффициенты Фурье в случае первой основной задачи с заданными на границе усилиями $\mathbf{p} \in \{p_x, p_y, p_z\}$, имеют вид:

$$c_k = (\mathbf{p}, \mathbf{u}^k) = \int_{\partial D} (p_x u^k + p_y v^k + p_z w^k) dl, \quad (13)$$

где $\mathbf{u}^k \in \{u^k, v^k, w^k\}$ – вектор перемещения в базисном элементе $\gamma_k = \{u_i^k, p_i^k\}$.

Коэффициенты Фурье в случае второй основной задачи с заданными на границе перемещениями $\mathbf{u} \in \{u, v, w\}$, имеют вид:

$$c_k = (\mathbf{u}, \mathbf{p}^k) = \int_{\partial D} (u p_x^k + v p_y^k + w p_z^k) dl, \quad (14)$$

где $\mathbf{p}^k \in \{p_x^k, p_y^k, p_z^k\}$ – вектор усилия в базисном элементе $\gamma_k = \{u_i^k, p_i^k\}$.

Основная смешанная задача состоит в определении механических характеристик, если на одной части границы ∂D_p заданы поверхностные усилия \mathbf{p} , а на другой части границы ∂D_u заданы поверхностные перемещения \mathbf{u} . Тогда, задача сводится к решению бесконечной системы линейных алгебраических уравнений:

$$\sum_{j=1}^{\infty} Q_{kj} c_j = q_k, \quad Q_{kj} = 2\delta_{jk} - a_{kj}; \quad (15)$$

$$a_{kj} = \int_{\partial D_p} u_i^{(j)} p_i^{(k)} dl + \int_{\partial D_u} p_i^{(j)} u_i^{(k)} dl; \quad q_k = \int_{\partial D_u} u_i p_i^{(k)} dl + \int_{\partial D_p} p_i u_i^{(k)} dl,$$

где компоненты с верхними индексами (j) и (k) принадлежат соответствующим компонентам в базисе граничных состояний. Компоненты без индексов соответствуют заданным граничным условиям [17, 22].

Обсуждение результатов. Решение основных задач средствами МГС.

Первая основная задача. Процесс реализации решения этого класса задач проведем на примере достаточно простой тестовой задачи для прямоугольной сплошной пластинки (рис. 2) из тканевого стеклопластика горячего прессования СТЭТ с углом поворота осей анизотропии относительно координатных на угол $\alpha = \pi/6$.

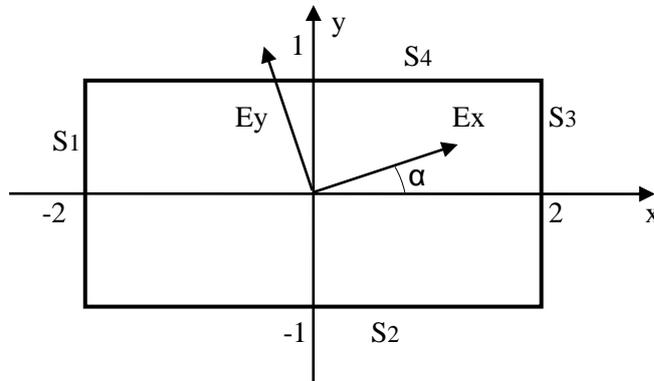


Рис. 2. Срединная плоскость прямоугольной пластинки, $z = 0$

Fig. 2. The median plane of the rectangular plate, $z = 0$

Для стеклопластика [10] (принят масштабный коэффициент $\eta^* = 10^5 \hat{e}\hat{a}/\hat{n}\hat{i}^2$) безразмерные физические параметры среды равны: $E_x = 3.59$, $E_y = 2.93$, $G_{xy} = 0.76$, $\nu_{xy} = 1.777$.

Пластинка занимает область $D = \{(x, y, z) | -2 \leq x \leq 2, -1 \leq y \leq 1, -0.1 \leq z \leq 0.1\}$. Пластинка нагружена по боковым граням усилиями, приводящими к скручивающим и изгибающим моментам:

$$\{p_x, p_y, p_z\} = \begin{cases} \{0, z, 0\}, x = -2, -1 \leq y \leq 1, -0.1 \leq z \leq 0.1; \\ \{z, z, 0\}, y = -1, -2 \leq x \leq 2, -0.1 \leq z \leq 0.1; \\ \{0, -z, 0\}, x = 2, -1 \leq y \leq 1, -0.1 \leq z \leq 0.1; \\ \{-z, -z, 0\}, y = 1, -2 \leq x \leq 2, -0.1 \leq z \leq 0.1. \end{cases}$$

Упругие параметры среды:

$$\begin{pmatrix} a_{11}, a_{12}, a_{16} \\ a_{12}, a_{22}, a_{26} \\ a_{16}, a_{26}, a_{66} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.4021 & -0.1682 & 0.1516 \\ -0.1682 & 0.4334 & -0.0973 \\ 0.1516 & -0.0973 & 0.8844 \end{pmatrix};$$

параметры B_{ij} и D_{ij} рассчитываются по зависимостям (6).

Комплексные корни векового уравнения (5):

$$\mu_1 = -0.2716 + 1.483 i, \mu_2 = 0.1897 + 0.6772 i.$$

Базисные наборы внутренних состояний можно конструировать, генерируя возможные варианты для двух аналитических функций $w_1(z_1)$ и $w_2(z_2)$. Для ограниченной односвязной области можно использовать фундаментальную систему многочленов Вейерштрасса:

$$\begin{pmatrix} w_1(z_1) \\ w_2(z_2) \end{pmatrix} \in \left\{ \begin{pmatrix} z_1^n \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ z_2^n \end{pmatrix}, \dots, \begin{pmatrix} iz_1^n \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ iz_2^n \end{pmatrix}, \dots \right\}, n = 1, 2, \dots$$

На основании системы многочленов и общего решения (4) формируются базисные элементы пространства внутренних состояний (9). Базисный набор векторов перемещений при $n = 2$ представлен в табл.1.

Таблица 1. Базисный набор векторов перемещений
Table 1. Basic set of displacement vectors

	u	v	w
ζ_1	$-2z$	$0.5432z$	$2x - 0.5432y$
ζ_2	$-2z$	$-0.3794z$	$2x + 0.3794y$
ζ_3	0	$2.9656z$	$-2.9656y$
ζ_4	0	$1.3543z$	$1.3543y$
ζ_5	$-4xz + 1.0864yz$	$1.0864xz + 8.5019yz$	$2x^2 - 1.0864xy - 4.2509y^2$
ζ_6	$-4xz - 0.7588yz$	$-0.7588xz + 1.6903yz$	$2x^2 + 0.7588xy - 8.8451y^2$
ζ_7	$5.9319yz$	$5.9319xz - 3.2222yz$	$-5.9319xy + 1.6111y^2$
ζ_8	$2.7087yz$	$2.7087xz + 1.0276yz$	$-2.7087xy - 0.5138y^2$

Далее проводится ортонормирование базиса внутренних состояний с помощью разработанного рекурсивно-матричного алгоритма ортогонализации [21]. Первые четыре базисных элемента, дающие нулевые скалярные произведения (10), отброшены. Базисный элемент ζ_8 линейно зависим по отношению к элементам $\zeta_5, \zeta_6, \zeta_7$.

В табл.2 приведем их ортонормированные выражения. На данном этапе формируется пространство граничных состояний (11) и вычисляются коэффициенты Фурье (13). Для решения тестовой задачи потребовалось три коэффициента Фурье:

$$\tilde{n}_1 = -0.05643; \tilde{n}_2 = 0.02696; \tilde{n}_3 = -0.0456.$$

Таблица 2. Ортонормированный базисный набор векторов перемещений
Table 2. Basic Set of Displacement Vectors

	u	v	w
ξ_1	$-3.9647xz + 1.0768yz$	$1.0768xz + 8.4269yz$	$1.9823x^2 - 1.0768xy - 4.2134y^2$
ξ_2	$-7.7246xz - 2.4122yz$	$-2.4122xz - 0.2312yz$	$3.8623x^2 + 2.4122xy + 0.1156y^2$
ξ_3	$-0.0244xz + 5.872yz$	$5.872xz - 3.1945yz$	$0.0122x^2 - 5.872xy + 1.5972y^2$

Окончательно искомые поля механических характеристик восстанавливаются по зависимостям (12):

$$\begin{aligned}
 u &= 0.01655xz - 0.39355yz; \\
 v &= -0.39355xz - 0.3361yz; \\
 w &= -0.00828x^2 + 0.39355xy + 0.16805y^2; \\
 \sigma_{xx} &= 0; \sigma_{yy} = -z; \tau_{xz} = 0; \tau_{yz} = 0; \tau_{xy} = -z.
 \end{aligned}$$

Здесь под x, y следует понимать их реальные значения, отнесенные к масштабному коэффициенту R . Нетрудно убедиться, что дифференциальное уравнение (3) и интегральные выражения (8) удовлетворяются тождественно. Форма пластинки изображена на рис. 3. Здесь и далее контур пластинок, для наглядности, изображен в гипертрофированном виде.

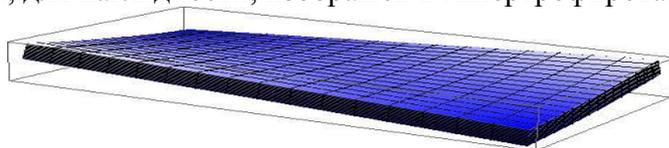


Рис.3. Форма изогнутой пластинки
Fig.3. Curved plate shape

В заключении можно сказать, что решение является строгим. Рассмотрим пластинку из того же материала, но нетривиальной формы (рис. 4).

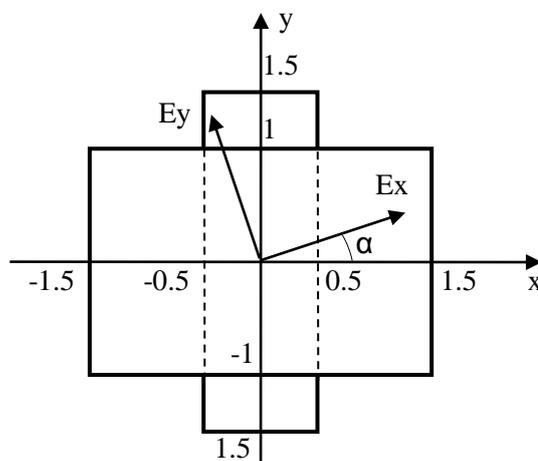


Рис. 4. Срединная плоскость пластинки нетривиальной формы, $z = 0$

Fig. 4. The median plane of the plate is non-trivial, $z = 0$

Область пластинки $D = D_1 + D_2 + D_3$,

$$D_1 = \{(x, y, z) \mid -1.5 \leq x \leq -0.5, -1 \leq y \leq 1, -0.1 \leq z \leq 0.1\};$$

$$D_2 = \{(x, y, z) \mid -0.5 \leq x \leq 0.5, -1.5 \leq y \leq 1.5, -0.1 \leq z \leq 0.1\};$$

$$D_3 = \{(x, y, z) \mid 0.5 \leq x \leq 1.5, -1 \leq y \leq 1, -0.1 \leq z \leq 0.1\}.$$

Граничные условия, имитирующие скручивание пластинки по двум граням:

$$\{P_x, P_y, P_z\} = \begin{cases} \{10z, 0, 0\}, y = -1.5, -0.5 \leq x \leq 0.5, -0.1 \leq z \leq 0.1; \\ \{-10z, 0, 0\}, y = 1.5, -0.5 \leq x \leq 0.5, -0.1 \leq z \leq 0.1; \end{cases}$$

на остальных поверхностях пластинки усилия отсутствуют. Для приближенного решения данной задачи использовался отрезок базиса внутренних состояний в $N = 69$ элементов. В табл.3 приведены ненулевые коэффициенты Фурье.

Таблица 3. Ненулевые коэффициенты Фурье
Table 3. Non-zero Fourier Coefficients

k	c_k										
1	-0.023	1	0.0559	25	0.0003	35	0.0108	49	-0.0095	59	0.0017
2	0.5157	6	-0.013	26	-0.0044	40	-0.0079	50	-0.0008	64	-0.0054
3	-0.1255	7	0.0312	27	0.0061	41	0.0179	51	0.0038	65	0.0141
8	0.0231	8	-0.0163	32	0.0102	42	0.0019	56	0.0098	66	-0.0037
9	-0.0441	9	-0.038	33	-0.0163	43	-0.0126	57	-0.0045	67	-0.0017
10	0.0462	24	0.0011	34	0.0047	48	-0.0055	58	0.0021		

Рис. 5 представляет собой график, иллюстрирующий «насыщение» суммы Бесселя (левая часть неравенства Бесселя). Это является косвенным признаком правильности полученного решения.

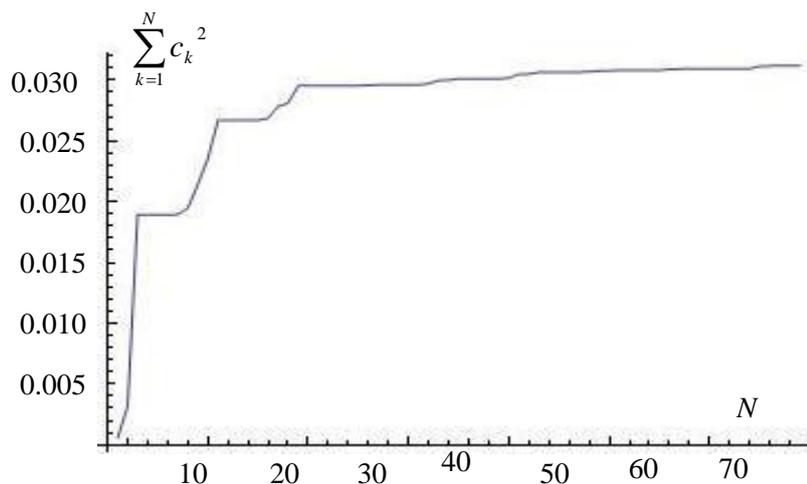


Рис. 5. Сумма Бесселя
Fig. 5. Bessel sum

На рис. 6 представлены изолинии компонент тензора напряжений на поверхности $z = 0.1$ (в силу симметрии изображена первая четвертая область).

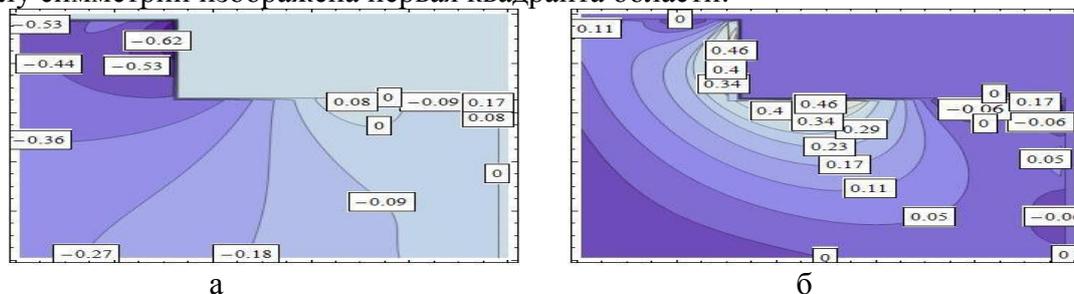


Рис. 6. Компоненты тензора напряжений: а – τ_{xy} , б – σ_x

Fig. 6. Components of the stress tensor: а – τ_{xy} , б – σ_x

где а – компоненты τ_{xy} , б – компоненты σ_x .

Контур пластинки в деформированном состоянии представлен на рис. 7.

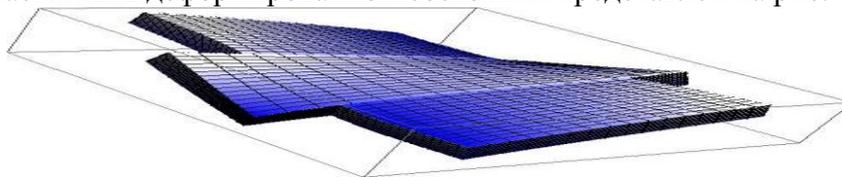


Рис. 7. Контур пластинки в деформированном состоянии
Fig. 7. The contour of the plate in the deformed state

Результат решения первой основной задачи для пластинки нетривиальной формы – приближенное аналитическое решение.

Вторая основная задача. Во второй основной задаче механики в качестве граничных условий задается вектор перемещения точек границы, компоненты которого несвязаны между собой, и задачей является отыскание напряженно-деформированного состояния от такого рода воздействия на границу тела. В теории изгиба пластин компоненты перемещения связаны между собой зависимостями (1), в противном случае будет нарушена гипотеза прямых нормалей [9]. Таким образом, задавая выражение для компоненты перемещения w , однозначно определяются две другие составляющие, а также деформации (1) и напряжения (2) и задача в такой постановке теряет смысл.

Основная смешанная задача. Рассмотрим пластинку с теми же геометрическими размерами и упругими константами, что и в тестовой задаче (рис. 2). Один край пластинки S_4 жестко зашпелен, на противоположном краю S_2 приложены усилия, приводящие к сжимающим и изгибающим моментам

$$\mathbf{p} \in S_1 \cup S_3, \mathbf{p} = 0; \mathbf{u} \in S_4, \mathbf{u} = 0; \mathbf{p} \in S_2, \mathbf{p} = \{z, z, 0\}.$$

Матрица коэффициентов a_{kj} имеет вид (усечена до 3×10):

$$a_{kj} = \begin{pmatrix} 1, & 0.1826, & 0.0477, & 0.0996, & -0.2167, & 0.4375, & -0.1111, & 0.4165, & 0.021, & -0.2085 \\ -0.1826, & 1, & 0.1257, & 0.4412, & -0.2133, & 0.2865, & -0.4923, & 0.5297, & -0.1270, & -0.7769 \\ -0.0477, & 0.1257, & 1, & -0.4679, & -0.0106, & 0.1004, & -0.1114, & 0.1596, & -0.1866, & 0.2966 \end{pmatrix} \text{Ко-}$$

эффициенты Фурье $q_k = q_1, q_2, q_3, \dots$ в условиях смешанных граничных условий (15):

$$q_k = -0.0245, 0.0112, -0.0053, 0.0035, -0.0028, -0.0111, 0.019, -0.0036, -0.0002, -0.0059, \dots$$

В решении данной задачи использовался базис внутренних состояний из 55 элементов. Полученное выражение для компоненты перемещения w имеет вид (сокращено в силу полной необозримости):

$$w \approx 0.017 x^2 - 0.031 x^3 - 0.0064 x^4 + \dots + 0.066 xy - 0.0645 x^2 y + 0.0097 x^3 y + \dots + 0.086 y^3 - 0.0096 xy^2 + 0.0163 x^2 y^2 - 0.022 x^3 y^2 - 0.006 x^4 y^2 + \dots$$

На рис. 8 изображен контур деформированной срединной поверхности пластинки.

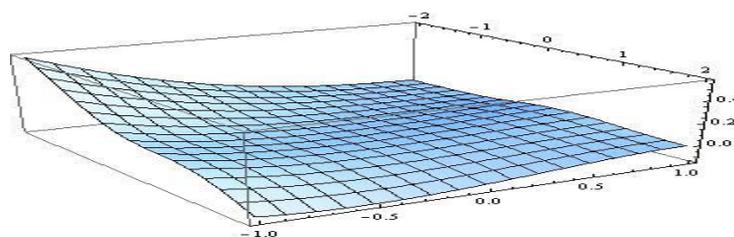


Рис. 8. Контур деформированной срединной поверхности
Fig. 8. The contour of the deformed median surface

На рис. 9 представлены изолинии компонент тензора напряжений на поверхности

$z = 0.1$: а – компоненты σ_{yy} , б – компоненты τ_{xy} .

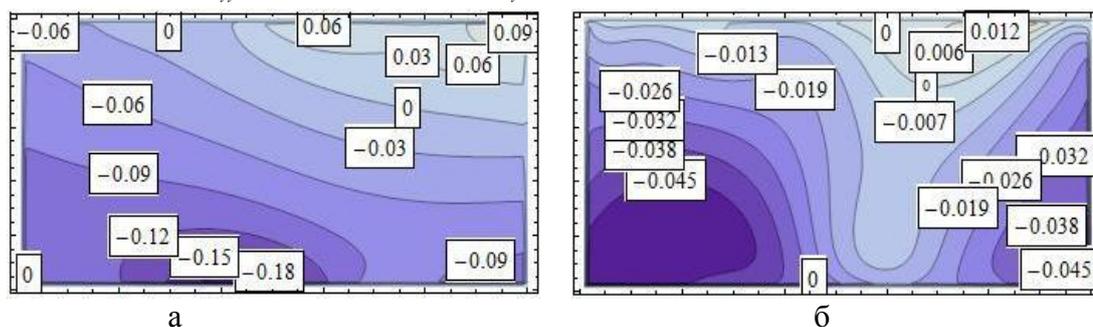


Рис. 9. Компоненты тензора напряжений: а – σ_{yy} , б – τ_{xy}

Fig. 9. Components of the stress tensor: а – σ_{yy} , б – τ_{xy}

Вывод. Анализ вышеизложенного позволяет сделать вывод о том, что метод граничных состояний оказался эффективным средством выписывания явного приближенного аналитического решения в задачах механики для анизотропных тонких плит. В работах [2–7] метод граничных состояний получил развитие на класс тел канонической формы (окружность, прямоугольник).

Библиографический список:

1. Амбарцумян С.А., Теория анизотропных пластин. М.:Наука, 1967. 268 с.
2. Иванычев Д.А., Метод граничных состояний в задачах изгиба анизотропных пластин // Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики. – сборник трудов Международной конференции. – Воронеж: Издательско-полиграфический центр Воронежского государственного университета, 2010. – 443 с.
3. Иванычев Д.А., Исследование изгиба анизотропных тонких плит методом граничных состояний // Материалы международной научной конференции «Современные проблемы математики, механики, информатики». Тула: Изд-во ТулГУ, 2011.– 272 с.
4. Иванычев Д.А., Решение задач изгиба анизотропных пластинок методом граничных состояний // Молодежь и наука: реальность и будущее: Материалы IV Международной научно-практической конференции / Редкол.: О.А. Мазур, Т.Н. Рябченко, А.А. Шатохин: в 4 томах. – Невинномысск: НИЭУП, 2011.Том IV: Естественные и прикладные науки. 562 с.
5. Иванычев Д.А., Бузина О.П., Исследование напряженно-деформированного состояния анизотропных пластинок методом граничных состояний // Сборник трудов «Механика. Научные исследования и учебно-методические разработки». БелГУТ, Гомель, Беларусь. 2014 г.
6. Иванычев Д.А., Изгиб анизотропных пластинок // Сб. науч. Трудов междунар. Науч.- техн. конф., «проблемы и перспективы развития машиностроения», посвящ. 60-ю Липецкого государственного технического университета. Часть 2. 17-18 ноября 2016 г. – Липецк: Изд-во ЛГТУ, 2016 г. – 356 с.
7. Иванычев Д.А., Метод граничных состояний в задачах теории анизотропной упругости. LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG Dudweiler Landstr, 66123 Saarbrucken, Germany, 2011. 99 с.
8. Космодамианский А.С. Напряженное состояние анизотропных сред с отверстиями и полостями. Издательское объединение «Вища школа», 1976, 200 с.
9. Лехницкий С.Г., Анизотропные пластинки. — М.: ГИТТЛ, 1957. — 463 с.
10. Лехницкий С.Г., Теория упругости анизотропного тела. – М.: Наука, 1977. – 416 с.
11. Лехницкий С.Г., О некоторых вопросах, связанных с теорией изгиба тонких плит // Прикладная математика и механика. – 1938. – Т. II. – Вып. 2. – С. 181 – 210.
12. Максименко В.Н., Подружин Е.Г., Изгиб конечных анизотропных пластин, содержащих гладкие отверстия и сквозные криволинейные разрезы. Сиб. журн. индустр. матем., 9:4 (2006), С. 125–135.
13. Максименко В.Н., Подружин Е.Г., Фундаментальные решения в задачах изгиба анизотропных пластин // Прикладная механика и техническая физика. 2003. Т. 44, №4. С. 135-143.
14. Недорезов П.Ф., Численное исследование напряженно-деформированного состояния в задачах изгиба тонкой анизотропной прямоугольной пластинки // Изв. Сарат. ун-та. 2009. Т. 9. Сер. Математика. Механика. Информатика, вып. 4, ч. 2.
15. Пеньков В.Б., Пеньков В.В. Метод граничных состояний для решения задач линейной механики // Дальневосточный математический журнал. – 2001. – Т.2, №2. – С.115-137.
16. Пеньков В.В., Метод граничных состояний в задачах линейной механики. [Текст] / В.В. Пеньков //Дисс... к. ф-м. н. – Тула, 2002. – 83 с.
17. Пеньков В.Б., Пеньков В.В., Метод граничных состояний для основной смешанной задачи линейного континуума // Всероссийская конференция. Тезисы докладов. – Тула, ТулГУ, 2000. – С. 108-110.
18. Подружин Е.Г. Приложение метода сингулярных интегральных уравнений к задачам изгиба анизотропных

пластин с многосвязным контуром [Текст] / Подружин Е.Г. // дис. д. т. н. - Новосибирск, 2007. - 272 с.

19. Ромакина О.М., Шевцова Ю.В., Метод сплайн-коллокации и его модификация в задачах статического изгиба тонкой ортотропной прямоугольной пластинки // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. 2010. Т. 10. Сер. Математика. Механика. Информатика, вып. 1.
20. Рябчиков П.Е., Напряженно-деформированное состояние анизотропных пластин сложной формы при изгибе [Текст] / Рябчиков П.Е. //: диссертация ... к. ф.-м. н. – Новосибирск, 2007. - 124 с.
21. Саталкина Л.В., Нарастивание базиса пространства состояний при жестких ограничениях к энергоемкости вычислений // Сборник тезисов докладов научной конференции студентов и аспирантов Липецкого государственного технического университета. Липецк: ЛГТУ, 2007 - С. 130 – 131.
22. Трещев А.А., Пеньков В.В., Метод граничных состояний: смешанная задача. // Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы строительства и строительной индустрии». Сборник материалов. Тула: Тульский полиграфист, 2001. – С.76.

References:

1. Ambartsumyan S.A. Teoriya anizotropnykh plastin. M.: Nauka; 1967. 268 s. [Ambartsumyan S.A. Theory of anisotropic plates. M.: Nauka; 1967. 268 p. (in Russ.)]
2. Ivanychev D.A. Metod granichnykh sostoyanii v zadachakh izgiba anizotropnykh plastin. Sbornik trudov Mezhdunarodnoi konferentsii "Aktual'nye problemy prikladnoi matematiki, informatiki i mekhaniki". Voronezh: Izdatel'sko-poligraficheskii tsentr Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta; 2010. 443 s. [Ivanychev D.A. The method of edge states in problems of bending of anisotropic plates. Proceedings of International conference "Relevant issues of applied mathematics, computer science and mechanics". Voronezh: Publishing and Printing Center of Voronezh State University; 2010. 443 p. (in Russ.)]
3. Ivanychev D.A. Issledovanie izgiba anizotropnykh tonkikh plit metodom granichnykh sostoyanii. Materialy mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii "Sovremennye problemy matematiki, mekhaniki, informatiki". Tula: Izd-vo TulGU; 2011. 272 s. [Ivanychev D.A. Investigation of the bending of anisotropic thin plates by the edge state method. Proceedings of International scientific conference "Modern issues of mathematics, mechanics and computer science". Tula: Izd-vo TulGU; 2011. 272 p. (in Russ.)]
4. Ivanychev D.A. Reshenie zadach izgiba anizotropnykh plastinok metodom granichnykh sostoyanii. Materialy IV Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Molodezh' i nauka: real'nost' i budushchee". Tom IV: Estestvennye i prikladnye nauki. Nevinnomyssk: NIEUP; 2011. 562 s. [Ivanychev D.A. Solution of the bending problems of anisotropic plates by the edge state method. Proceedings of IV International scientific-practical conference "Youth and Science: Reality and the Future". Vol. IV: Natural and Applied Sciences. Nevinnomyssk: NIEUP; 2011. 562 p. (in Russ.)]
5. Ivanychev D.A., Buzina O.P. Issledovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya anizotropnykh plastinok metodom granichnykh sostoyanii. Sbornik trudov "Mekhanika. Nauchnye issledovaniya i uchebno-metodicheskie razrabotki". BelGUT: Gomel, Belarus; 2014. [Ivanychev D.A., Buzina O.P. Investigation of the stress-strain state of anisotropic plates by the edge states method. Collection of works "Mechanics. Scientific research and educational methodical developments". BelGUT: Gomel, Belarus; 2014. (in Russ.)]
6. Ivanychev D.A. Izgib anizotropnykh plastinok. Sb. nauch. trudov mezhdunar. nauch.- tekhn. konf. "Problemy i perspektivy razvitiya mashinostroeniya". Chast' 2. Lipetsk: Izd-vo LGTU; 2016. 356 s. [Ivanychev D.A. Bending of anisotropic plates. Proceedings of the International scientific-technical conference "Problems and perspectives of the development of machine-building". Part 2. Lipetsk: Izd-vo LGTU; 2016. 356 p. (in Russ.)]
7. Ivanychev D.A. Metod granichnykh sostoyanii v zadachakh teorii anizotropnoi uprugosti. Saarbrucken: LAP LAMBERT Academic Publishing; 2011. 99 s. [Ivanychev D.A. The method of edge states in problems of the theory of anisotropic elasticity. Saarbrucken: LAP LAMBERT Academic Publishing; 2011. 99 p. (in Russ.)]
8. Kosmodamianskii A.S. Napryazhennoe sostoyanie anizotropnykh sred s otverstiyami i polostyami. Izdatel'skoe ob"edinenie "Vishcha shkola"; 1976. 200 s. [Kosmodamianskii A.S. Stress state of anisotropic media with holes and cavities. Publishing Association "Vishcha shkola"; 1976. 200 p. (in Russ.)]
9. Lekhnitskii S.G. Anizotropnye plastinki. M.: GITTL; 1957. 463 s. [Lekhnitskii S.G. Anisotropic plates. M.: GITTL; 1957. 463 p. (in Russ.)]
10. Lekhnitskii S.G. Teoriya uprugosti anizotropnogo tela. M.: Nauka; 1977. 416 s. [Lekhnitskii S.G. Theory of elasticity of an anisotropic body. M.: Nauka; 1977. 416 p. (in Russ.)]
11. Lekhnitskii S.G. O nekotorykh voprosakh, svyazannykh s teoriei izgiba tonkikh plit. Prikladnaya matematika i mekhanika. 1938; II(2): 181 – 210. [Lekhnitskii S.G. On some questions connected with the theory of the bending of thin plates. 1938; II(2): 181 – 210. (in Russ.)]
12. Maksimenko V.N., Podruzhin E.G. Izgib konechnykh anizotropnykh plastin, sodержashchikh gladkie otverstiya i skvozhnye krivolineinye razrezy. Sib. zhurn. industr. matem. 2006;9(4): 125–135. [Maksimenko V.N., Podruzhin E.G. Bending of finite anisotropic plates containing smooth holes and through curved sections. Journal of Applied and Industrial Mathematics. 2006;9(4): 125–135. (in Russ.)]
13. Maksimenko V.N., Podruzhin E.G. Fundamental'nye resheniya v zadachakh izgiba anizotropnykh plastin. Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika. 2003; 44(4):135-143. [Maksimenko V.N., Podruzhin E.G. Fundamental solutions in problems of bending of anisotropic plates. Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 2003; 44(4):135-143. (in Russ.)]

14. Nedorezov P.F. Chislennoe issledovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya v zadachakh izgiba tonkoi anizotropnoi pryamougol'noi plastinki. *Izv. Sarat. un-ta. Nov.ser. Ser. Matematika. Mekhanika. Informatika.* 2009; 9(4):143-148. [Nedorezov P.F. Numerical investigation of a stress-strain state in bending problems of a thin anisotropic rectangular plate. *Izvestiya of Saratov University. New Series. Series: Mathematics. Mechanics. Informatics.* 2009.9(4):143-148.(in Russ.)]
15. Pen'kov V.B., Pen'kov V.V. Metod granichnykh sostoyanii dlya resheniya zadach lineinoi mekhaniki. *Dal'nevostochnyi matematicheskii zhurnal.* 2001; 2(2):115-137. [Pen'kov V.B., Pen'kov V.V. The method of edge states for solving linear mechanics problems. *Far Eastern Mathematical Journal.* 2001;2(2):115-137. (in Russ.)]
16. Pen'kov V.V. Metod granichnykh sostoyanii v zadachakh lineinoi mekhaniki. *Diss... k. f.-m. n. Tula;* 2002. 83 s. [Pen'kov V.V. The method of edge states in problems of linear mechanics. *Candidate of physics and mathematical sciences thesis.* Tula; 2002. 83 p. (in Russ.)]
17. Pen'kov V.B., Pen'kov V.V. Metod granichnykh sostoyanii dlya osnovnoi smeshannoi zadachi lineinogo kontinuuma. *Tezisy докладов Vserossiiskoy konferentsii.* Tula: TulGU; 2000. P. 108-110. [Pen'kov V.B., Pen'kov V.V. The method of edge states for the basic mixed problem of a linear continuum. *Abstracts of All-Russian conference.* Tula: TulGU; 2000. P. 108-110. (in Russ.)]
18. Podruzhin E.G. Prilozhenie metoda singulyarnykh integral'nykh uravnenii k zadacham izgiba anizotropnykh plastin s mnogosvyaznym konturom. *Dis... d. t. n. Novosibirsk;* 2007. 272 s. [Podruzhin E.G. Application of the method of singular integral equations to the problems of the bending of anisotropic plates with a multiply connected contour. *Doctor of technical sciences thesis.* Novosibirsk; 2007. 272 p. (in Russ.)]
19. Romakina O.M., Shevtsova Yu.V. Metod splain-kollokatsii i ego modifikatsiya v zadachakh staticheskogo izgiba tonkoi ortotropnoi pryamougol'noi plastinki. *Izv. Sarat. un-ta. Nov.ser. Ser. Matematika. Mekhanika. Informatika.* 2010; 10(1):78-82. [Romakina O.M., Shevtsova Yu.V. Spline collocation method and its modification in static bending problems of a thin orthotropic rectangular plate. *Izvestiya of Saratov University. New Series. Series: Mathematics. Mechanics. Informatics.* 2010; 10(1):78-82. (in Russ.)]
20. Ryabchikov P.E. Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie anizotropnykh plastin slozhnoi formy pri izgibe. *Dissertatsiya ... k. f.-m. n. Novosibirsk;* 2007. 124 s. [Ryabchikov P.E. Stress-strain state of anisotropic plates of complex shape with bending. *Candidate of physics and mathematical sciences thesis.* Novosibirsk; 2007. 124 p. (in Russ.)]
21. Satalkina L.V. Narashchivanie bazisa prostranstva sostoyanii pri zhestkikh ogranicheniyakh k energoemkosti vychislenii. *Sbornik tezisev докладов nauchnoi konferentsii studentov i aspirantov Lipetskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta.* Lipetsk: LGTU; 2007. P. 130 – 131. [Satalkina L.V. Extension of the basis of the state space under tight constraints to the energy consumption of computations. *Abstracts of scientific conference of students and post-graduate students of Lipetsk State Technical University.* Lipetsk: LSTU; 2007. P. 130 – 131. (in Russ.)]
22. Treshchev A.A., Pen'kov V.V. Metod granichnykh sostoyanii: smeshannaya zadacha. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Aktual'nye problemy stroitel'stva i stroitel'noi industrii"*. Tula: Tul'skii poligrafist; 2001. P.76. [Treshchev A.A., Pen'kov V.V. Method of edge states: a mixed problem. *Materialy International scientific and technical conference "relevant issues of construction and construction industry"*. Tula: Tul'skii poligrafist; 2001. P.76. (in Russ.)]

Сведения об авторе:

Иванычев Дмитрий Алексеевич – кандидат физико-математических наук, доцент, кафедра «Общая механика».

Information about the author

Dmitriy A. Ivanychev – Cand. Sci. (Physical and Mathematical), Assoc. Prof., Department of «General Mechanics».

Конфликт интересов.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 29.03.2018.

Принята в печать 10.05.2018.

Conflict of interest.

The author declare no conflict of interest.

Received 29.03.2018.

Accepted for publication 10.05.2018

Для цитирования: Адалаева П.Ш., Айгумов Т.Г., Магомедова С.В., Челушкина Т.А. Идентификация воздушных радиолокационных целей при помощи эффекта доплера от нагретого реактивного двигателя. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2018; 45(2): 31-41. DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-2-31-41

For citation: Adalaeva P.Sh., Aigumov T.G., Magomedova S.V., Chelushkina T.A. Identification of air radar targets using the doppler effect from a heated jet engine. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2018; 45 (2): 31-41. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-2-31-41

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.362

DOI: 10.21822/2073-6185-2018-45-2-31-41

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ВОЗДУШНЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ЦЕЛЕЙ ПРИ ПОМОЩИ ЭФФЕКТА ДОПЛера ОТ НАГРЕТОГО РЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Адалаева П.Ш.³, Айгумов Т.Г.², Магомедова С.В.⁴, Челушкина Т.А.¹

¹⁻⁴Дагестанский государственный технический университет,

¹⁻⁴367026, г. Махачкала, пр. Имама Шамиля, 70, Россия,

¹e-mail:tatyana.chelushkina@yandex.ru, ²e-mail: 915533@mail.ru,

³e-mail:holodnaya2011@mail.ru, ⁴e-mail: romanenko_c_v@mail.ru

Резюме. Цель. Целью исследования является разработка методики диагностирования летательных аппаратов по отраженному электромагнитному радиолокационному лучу от нагретого реактивного двигателя. **Методы.** Атомы кристаллической решетки металлических деталей на работающем реактивном двигателе за счет нагрева будут находиться в состоянии хаотического броуновского движения. Электромагнитный луч, попадая на эти атомы, будет менять свою частоту в соответствии с эффектом Доплера, тем самым спектральная составляющая электромагнитного излучения будет расширяться прямо пропорционально величине температуры двигателя. При определении ширины спектральной линии пеленгующего радиоизлучения можно точно идентифицировать температуру летательного аппарата для исключения ложных целей. **Результат.** При пеленгации летательных аппаратов с работающим реактивным двигателем возможно не только определение координат цели, но и идентификация нагретого двигателя. Засчет применения высокоточных методов идентификации нагретых участков, возможна не только классификация пеленгуемых целей, но и определение ориентации в пространстве, как самого летательного аппарата, так и его управляющих плоскостей и направление вектора управляемой тяги реактивного двигателя. **Вывод.** Применение инновационной методики пеленгации воздушных целей позволит с высокой точностью идентифицировать радиолокационные цели на фоне активных и пассивных помех. Кроме того, при анализе информации о величине и направлении тяги реактивного двигателя и положения органов управления летательного аппарата возможно определение не только координат пеленгуемого объекта, но и с упреждением идентифицировать выполняемые маневры.

Ключевые слова: эффект Доплера, реактивный двигатель, пеленгация, спектр, электромагнитное излучение

TECHNICAL SCIENCE
POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL MECHANICAL ENGINEERING

IDENTIFICATION OF AIR RADAR TARGETS USING THE DOPPLER EFFECT FROM A
HEATED JET ENGINE

*Patimat Sh.Adalaeva*³, *Timur G.Aigumov*², *Sabina V. Magomedova*⁴, *Tatyana A.Chelushkina*¹

¹⁻⁴Daghestan State Technical University,

¹⁻⁴70 I. Shamilya Ave., Makhachkala 367026, Russia,

¹e-mail: tatyana.chelushkina@yandex.ru, ²e-mail: 915533@mail.ru,

³e-mail: holodnaya2011@mail.ru, ⁴e-mail: romanenko_c_v@mail.ru

Abstract Objectives The aim of the study is to develop a methodology for identifying aircraft by the deflections of an electromagnetic radar beam by a heated jet engine. **Methods** Atoms of the crystal lattice of the metallic parts of the operating jet engine will be in a state of chaotic Brownian motion due to heating. The electromagnetic beam, falling on these atoms, will change its frequency in accordance with the Doppler effect, by means of which the spectral electromagnetic radiation component will expand in direct proportion to the magnitude of the engine temperature. When determining the width of the spectral line of the direction-finding radio emission, it is possible to accurately identify the temperature of the aircraft in order to avoid false targets. **Results** When locating aircraft having a working jet engine, it is possible not only to determine the coordinates of the target, but also to identify the heated engine. Due to the use of high-precision methods for identifying heated sections, the direction-finding targets may be classified, the spatial orientation of both the aircraft itself and its control planes to be determined and the direction of the thrust vector control of the jet engine calculated. **Conclusion** The application of an innovative technique for direction-finding air targets will allow the radar targets to be identified with high accuracy against the background of active and passive interferences. In addition, when analysing the information on the magnitude and direction of the jet engine thrust and the position of the aircraft controls, it is possible to determine not only the coordinates of the direction-finding object, but also to proactively identify the manoeuvres to be performed.

Keywords: Doppler effect, jet engine, direction-finding, spectrum, electromagnetic radiation

Введение. Современное состояние развития военно-воздушных сил в наиболее передовых и развитых в техническом отношении странах привело к основной дилемме противостояния летательных аппаратов, наземных и воздушных космических средств противовоздушной обороны [8-26]. На сегодняшний день лучшей системой противовоздушной обороны является С-500 «Прометей».

Для противодействия этим системам разработаны различные меры систем противовоздушной обороны [1-7]. Одним из факторов для идентификации воздушной цели является определение их на фоне неподвижных предметов по эффекту Доплера.

Летательный аппарат на фоне горы или земли невидим в обычном радиоизлучении, так как его отражение теряется на фоне отражения от других наземных или воздушных объектов. Чтобы определить именно перемещающийся летательный аппарат требуется идентифицировать его по скорости движения. Эффект Доплера подразумевает, что при отражении сигнала от неподвижной цели радиоволна не меняет своей фазы и частоты, а при отражении от подвижной цели, в зависимости от направления движения, меняется частота сигнала.

Для противодействия мерам обнаружения используются различные манёвры, в том числе для того, чтобы «сбить с толку» ракету, идущую по тепловому излучению двигателей, которые в этот момент работают на форсированном режиме. Так, например, фигуры высшего пилотажа типа «колокол» и «кобра» позволяют кратковременно летательному аппарату зависнуть в пространстве, и относительно неподвижной земли его скорость становится нулевой (рис. 2).



Рис. 1. Фигура высшего пилотажа типа «колокол» и «кобра»
Fig. 1. The figure of aerobatics such as «bell» and «cobra»

В этом случае ракета может не попасть в цель, так как она перестаёт видеть неподвижный объект. Хотя самолёт неподвижен и отражённый луч от него не меняет своей частоты, не позволяя его идентифицировать, тем не менее, работающий двигатель испускает тепловое излучение, и тепловой датчик в инфракрасном диапазоне прекрасно видит летательный аппарат и может продолжить наведение ракеты.

В этом случае, чтобы сбить такой датчик с толку используются тепловые ловушки. При этом отстреливаются специальные термические патроны, температура горения которых составляет 3000°C, и они отвлекают на себя ракету от основной цели.



Рис. 2. Истребитель пятого поколения F-22 Raptor и вертолет КА-52 выпускают тепловые ложные цели для защиты от ракет с инфракрасным датчиком наведения
Fig. 2. Fifth-generation F-22 Raptor fighter and KA-52 helicopter produce thermal false targets for protection against missiles with an infrared sighting sensor

Применение этих ловушек прогрессировало. Большое их количество и разнообразие используют современные летательные аппараты, например, истребители пятого поколения и вертолёты (рис. 3). Противостоять таким тепловым ловушкам современные системы воздушной обороны пока не могут.

Постановка задачи. Для успешного решения данной проблемы необходимо преодоление различных средств противовоздушной обороны. Одним из основных направлений является создание эффекта невидимости.

Эффект невидимости получается различными способами: изменение геометрии летательного аппарата, защита его радиопоглощающими покрытиями на поверхности летательного аппарата, формирование различных систем помех.

Для точной идентификации радиолокационной цели на фоне активных и пассивных помех в радиодиапазоне и исключения влияния тепловых ловушек при пеленгации и наведении на летательный аппарат необходимо использовать двойной эффект Доплера: первый эффект Доплера определяет скорость пеленгуемой цели по изменению фазы и частоты отраженного радиосигнала от летательного аппарата; второй эффект Доплера определяет рассеяние частоты при отражении от нагретых атомов двигателя летательного аппарата.

Методы исследования. Обычный параболический локатор или цифровая активная антенная решетка посылают параллельный поток электромагнитного излучения в пространство и принимают отраженные радиосигналы от различных объектов. По времени прохождения сигналов к цели и обратно с учетом скорости электромагнитного излучения можно определить расстояние до цели, а по азимутальному углу и углу места, можно определить направление на цель. Для такого типа пеленгации требуются локаторы с узкой игольчатой диаграммой направленности с возможностью сканирования заданного участка пространства.

Большинство электромагнитных радиоволн отражается от неподвижных объектов: земля, горы, водная поверхность и т.д. В этом случае частота радиосигнала остается неизменной. Но, если объект движется, то радиосигнал будет изменять частоту и фазу отраженного радиосигнала в зависимости от скорости и направления движения.



Рис. 4. Схема излучения радиоволны от подвижного объекта
Fig. 4. The scheme of radiation of a radio wave from a mobile object

На рис.4 приведена схема излучения радиоволны от подвижного объекта. В направлении движения частота максимально увеличена, за счёт того, что объект в этом направлении перемещается на определённое расстояние. В противоположном направлении частота максимально растянута.

По всем остальным направлениям частота занимает промежуточные значения, от максимального при движении вперёд, до минимального при движении назад радиоволны от отражённого объекта. Это справедливо в том случае если цель движется, а сам излучающий локатор не подвижен. Однако локатор может быть установлен также на подвижной цели, например, автомобиле, судне, воздушном объекте, на космическом спутнике. В этом случае необходимо определить только относительную скорость. Тем не менее, эта информация также позволяет идентифицировать радиолокатором цель.

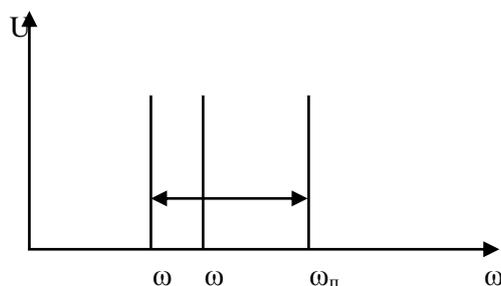


Рис. 5. График изменения основной частоты при движении объектов вперёд в сторону локатора или от локатора
Fig. 5. The graph of the change in the fundamental frequency when moving objects forward in the direction of the locator or from the locator

На рис. 5 приведён график изменения основной частоты ω_0 при движении объектов вперёд в сторону локатора с частотой приближения ω_n или от локатора с частотой удаления ω_y .

На рис. 5 видно, что скорость удаления в конкретном случае будет составлять меньшее значение по амплитуде, чем скорость приближения. Но они могут быть равны либо значительно отличаться друг от друга как в одну, так и в другую сторону. Этот эффект хорошо используется современными локационными станциями.

На рис. 6 приведен график отражения радиоволны от нагретого двигателя летательного аппарата.

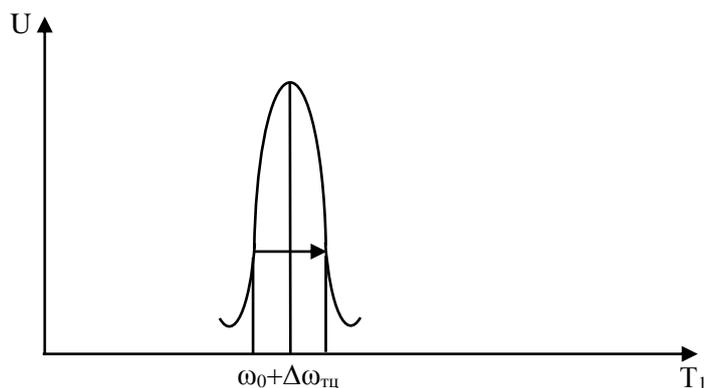


Рис. 6. График отражения радиоволны от нагретого двигателя летательного аппарата
Fig. 6. A Graph of the reflection of a Radio wave from a Heated Aircraft Engine

Здесь видно, что основная частота ω_0 испытывает воздействие от нагретого материала, за счёт того, что броуновское движение перемещает атомы и молекулы то в сторонулокатора, то в противоположную сторону от локатора. Частота ω_0 получит приращение $\Delta\omega_{ТН}$ температурное от цели в сторону увеличения и уменьшения от среднего значения. Чем выше температура, тем больше будет рассеяние.

На рис.7 приведен график отражения от тепловой ловушки, имеющий гораздо большую температуру и придающий гораздо большее рассеяние лучу от радиолокатора с приращением $\Delta\omega_{ТЛ}$ к основной частоте ω_0 .

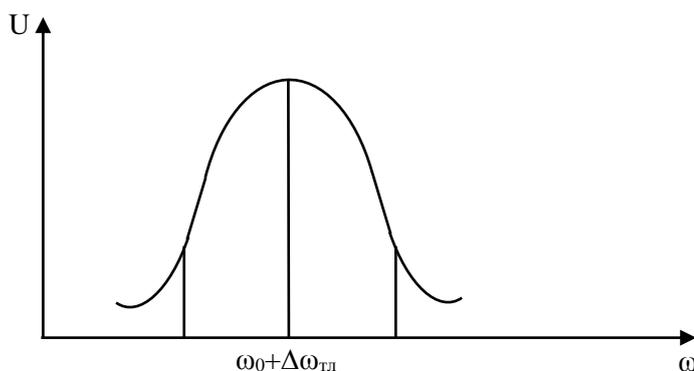


Рис. 7. График отражения от тепловой ловушки, имеющий гораздо большую температуру и придающий гораздо большее рассеяние лучу от радиолокатора
Fig. 7. The reflection from the heat trap, which has a much higher temperature and gives much more scattering to the beam from the radar

Данный эффект Доплера можно записать в следующем виде:

$$\omega = \omega_0 \frac{\left(1 + \frac{V_{л}}{c}\right)}{\left(1 - \frac{V_{ц} \pm \sqrt{\frac{3kT}{\mu}}}{c}\right)} \quad (1)$$

где ω – частота;

ω_0 – исходная частота локатора;

$V_{л}$ – скорость движения локатора относительно цели;

c – скорость света;

$V_{ц}$ – скорость движения цели относительно локатора;

k – постоянная Больцмана;

T – температура поверхности цели;

μ – молярный вес атомов на нагретой поверхности цели.

Частота, отражённая от нагретого объекта будет зависеть от основной частоты ω_0 и скорости движения самого локатора, в том случае если он находится на подвижном объекте летательном аппарате судне или в автомобиле, а также от скорости от цели и приращение от того, что эта цель имеет определённую температуру нагрева.

Таким образом, частота будет варьироваться в определённом диапазоне, который зависит, во-первых, от скорости летательного аппарата относительно измеряемого локатора, то есть приближается и удаляется и, во-вторых, от ширины радиолуча, отражённого от этого объекта и определяющего температуру этого объекта.

Таким образом, математическое ожидание принятой частоты соответствует скорости перемещения относительно объекта, а дисперсия этого сигнала означает температуру этого объекта. Данные вычисления позволяют определить бортовому локатору, какая перед ним цель, с какой скоростью она движется, где находятся тепловые ловушки, где двигатель объекта и как сориентирован в пространстве сам объект. В этом случае можно будет определять все возможные эволюции в пространстве летательных объектов, и идентифицировать ориентацию в пространстве этого объекта, ориентацию его органов управления, как например реактивный двигатель с управляемым вектором тяги.

Обсуждение результатов. Для повышения точности диагностики летательных аппаратов необходимо изменить алгоритм работы управления излучателями цифровой антенны фазированной активной решётки (ЦАФАР). Это можно сделать таким образом, что вместо параллельного потока электромагнитного излучения можно сфокусировать его и сделать сходящимся, то есть заменить параболическую диаграмму направленности на – эллиптическую.

При параболической форме антенны излучатель находится в фокусе параболоида и радиоволны, выходящие из него, отражаясь от поверхности металлического параболоида, приобретают параллельные траектории. Направление полёта радиоволн зависит от направления самого параболического зеркала. В эллиптической антенне металлическая поверхность имеет форму эллипса, фрагмента эллиптической поверхности так же, как и фрагмента параболической поверхности у обычных антенн.

В этом случае лучи будут идти не параллельно, а сходиться из одного фокуса в другой. В одном фокусе будет находиться излучатель электромагнитных волн, а в другом будет находиться пеленгуемый объект. Недостатком такой антенны является то что, расстояние между фокусами является фиксированной величиной для заданной формы эллипса. Но с появлением ЦАФАР появилась возможность изменять точку схождения, то есть менять дистанцию между фокусами эллиптической антенны. В этом случае при изменении настройки приёмопередающих модулей ЦАФАР можно таким образом формировать поток электромагнитного излучения, что он будет сходиться в выбранной точке пространства.

Такой подход является ценным в отличие от обычных локаторов тем, что он позволяет проигнорировать все активные пассивные помехи, которые расположены между целью и локатором. Если раньше любая помеха, находящаяся между ними, создавала препятствие для приёма полезного сигнала, отражённого от цели, то в этом случае, только сигнал, отражённый от цели будет суммироваться и находиться в резонансе с входными контурами антенны, а все объекты, которые находятся между этими фокусами, не будут оказывать существенного влияния.

В акустике подобный эффект наблюдается в галереях, в овальных кабинетах и т. д.

Аналогичную систему, когда даже слабый сигнал будет восприниматься как мощное излучение, передаваемое из одного фокуса в другой, можно достичь и в радиолокации. Аналогом эллиптической сферы может служить освещение прожекторами самолёта противника в ночное время. Параллельный пучок зенитного прожектора позволяет нам осветить самолёт на ночном небе, но, если параллельный пучок заменить на сходящийся, то эти лучи сфокусируются таким образом, что мы увидим ослепительный пучок света на отдельно выбранном фрагменте самолёта крыле, корпусе, в хвостовом оперении и так далее. Аналогично можно сфокусировать и

электромагнитные волны, и тогда они будут отражаться не от всей поверхности летательного аппарата, а только от его отдельных фрагментов. При этом этот фрагмент будет облучаться с гораздо большей мощностью по сравнению с обычными параболическими локаторами.

При таком подходе можно сфокусировано облучать нос, корпус, хвостовое оперение, либо двигатели летательного аппарата и, тем самым, диагностировать точное место расположения и ориентацию в пространстве летательного аппарата.

Также можно не только сам летательный аппарат оценить размещённый в пространстве, но и положение его органов управления, хвостового оперения, закрылков, предкрылков или управляемых векторов тяги двигателей. Это позволит определить эволюцию летательного аппарата и экстраполировать его манёвры, что даст несомненное преимущество при проведении боевых действий. Кроме того, эллиптическая диаграмма направленности позволит так сфокусировать дистанцию до объекта, что это будет дополнительной информацией помимо определения дистанции по времени прохождения радиолуча туда и обратно от цели.

При таком подходе, произвольно выбираемая дистанция также даёт дополнительную точность при оценке расстояния до летального аппарата. Кроме того, фокусирование радиоизлучения на двигателях позволит точно оценить их температуру и провести идентификацию, что это именно летательный аппарат температурой двигателя 700-800°С, а не тепловая ловушка с температурой до 3000°С.

Применение такой параболической диаграммы направленности, за счёт изменения режимов работы ЦАФАР, позволит провести точную диагностику не только места положения летательного аппарата, но и его ориентацию в пространстве конкретным местоположением его органов управления. Кроме того, данная методика позволит нам провести целенаправленный поиск заданной точки пространства не одного летательного аппарата, а одновременно нескольких. Это является необходимым в условиях маневренных боевых действий с применением большого количества летательных аппаратов.

Ещё одним преимуществом такой диаграммы направленности является то, что сам летательный аппарат не будет знать о том, что его облучают при такой диаграмме направленности, так как можно направить точку облучения на двигатели, где нет приёмных устройств и можно точно диагностировать перемещение летательного аппарата. Излучение от наземных объектов будет слишком малой величины и не позволит пилоту идентифицировать, что он уже захвачен как цель и не даст ему возможности совершить противоракетный манёвр.

Данный режим может быть реализован на обычной ЦАФАР без переделки аппаратной части только за счёт изменения соответствующего программного обеспечения, которое управляет фазовращателями. В случае экспортного варианта локатора или уничтожения летательного аппарата с бортовым локационным оборудованием соответствующего назначения, программное обеспечение может быть легко уничтожено, либо заменено на другое «фальшивое» для того, чтобы не дать противнику возможности повторить подобную систему на своих летательных аппаратах.

Эллиптическая диаграмма направленности в составе ЦАФАР может быть реализована и в распределённом варианте, когда одновременно обрабатывается информация от нескольких летательных аппаратов наземных, надводных, подводных и космических аппаратов. Единая система радиолокации позволит не только повысить точность идентификации, но и затруднит самому пеленгуемому объекту определить, откуда, и кто его облучает. Так как у разных углов облучения будет слишком много и, кто именно его в этот момент запеленговал, летательному аппарату будет не известно. В этом случае возрастёт точность и дальность пеленгации за счёт интегральной обработки поступающей информации.

Дальнейшее развитие этой методики позволяет подключить оптические лазеры, которые также отражаясь от нагретых участков самолёта, будут модулироваться эффектом Доплера и позволят ещё с большей точностью оценить температуру нагретых поверхностей в условиях прямой видимости летательных аппаратов для более высокой точности поражения перспективных целей.

Принципы нахождения объектов в воздухе и под водой одинаковые. Подводная лодка,

находящаяся на глубине, или торпеда, имеют температуру, немного отличающуюся от окружающего океана. В результате, подобная методика может быть использована не только для летательных аппаратов, но и для подводных лодок и торпед, тем самым позволяя идентифицировать именно необходимую цель для принятия последующих решений.

Вывод. Подобная методика позволяет эффективно отстраниться от активных и пассивных помех, которые предпринимает противник для несанкционированного доступа в зону, охраняемую военно-воздушной обороной, для нанесения ракетно-бомбовых ударов.

Данные системы могут быть установлены на спутниках, морских судах, наземных неподвижных стационарных и подвижных стационарных объектах. Информация может в них компилироваться и обрабатываться. Наиболее целесообразным является использование данного метода в ЦАФАР, которые позволяют с высокой точностью идентифицировать как саму цель, так направление движения, а также остальные параметры, необходимые для сопровождения целей.

Библиографический список:

1. Патент RU №2358284. МПК: G01S 13/08. Устройство устранения неоднозначных измерений дальности до целей, находящихся за пределами рабочей зоны радиолокационной станции/ Беляков Е.С., Кострова Т.Г., Антуфьев Р.В., Костров В.В.// Оpubл. 10.06.2009. Бюл. №16.
2. Патент RU №2149421. МПК: G01S 13/04. Способ радиолокационного обнаружения и сопровождения объектов и РЛС для его реализации / Беляев Б.Г., Голубев Г.Н., Жибинов В.А., Щекотов Ю.П.// Оpubл. 20.05.2000. Бюл. №14.
3. Патент RU №2389039. МПК: G01S 13/58. Способ измерения радиальной скорости воздушной цели в режиме перестройки частоты от импульса к импульсу по случайному закону при пониженном отношении сигнал-шум / Митрофанов Д.Г., Силаев Н.В., Майоров Д.А., Тулузаков В.Г., Немцов А.В.// Оpubл. 20.05.2010. Бюл. №13.
4. Патент RU №2341813. МПК: G01S 13/04. Подвижная наземная двухкоординатная РЛС кругового обзора метрового диапазона/ Башев В.В., Грачев О.Д., Зачепицкий А.А., Зяблов Н.Е., Кокурошников С.М., Малков М.А.// Оpubл. 20.12.2008. Бюл. №35.
5. Патент RU №2302077. МПК: H04B 1/04. Способ обработки сигнала / Анташев А.Б., Анташев В.Б., Анташев Д.А., Анташев П.В.// Оpubл. 27.06.2007. Бюл. №18.
6. Патент RU №2326401. МПК: G01S 13/34, H04D 7/00. Способ обнаружения сигнала / Анташев А.Б., Анташев В.Б., Анташев Д.А., Анташев П.В., Дементьев Р.С.// Оpubл. 10.06.2008. Бюл. №16.
7. Под ред. Соколов М. Вопросы перспективной радиолокации. - М.: Радиотехника. 2003. – 512 с.
8. Перунов Ю.М., Куприянов А.И. Радиоэлектронная борьба: радиотехническая разведка. - М.: Вузовская книга. 2016. – 190 с.
9. Радзиевский В.Г., Трифонов П.А. Обработка сверхширокополосных сигналов и помех. - М.: Радиотехника. 2009. – 288 с.
10. Панычев С.Н., Питолин В.М., Самоцвет Н.А. Универсальный показатель для оценки эффективности маскирующих и имитационных помех//Радиотехника. - 2016. - №6. - С. 26-30.
11. Литвинов Н.Н., Лаврентьев А.М. Анализ. Возможности маскировки зондирующих сигналов радиолокационных станций группировки противовоздушной обороны//Вестник Воздушно-космической обороны. - М.: ПАО «НПО «Алмаз». - 2017. - № 1 (13). - С. 38-43.
12. Головков А.А., Минаков В.Г. Синтез согласующе-фильтрующих устройств амплитудно-фазовых манипуляторов при включении управляемого элемента последовательно источнику сигнала//Телекоммуникации. - 2005. - № 3. - С. 33-37.
13. Головков А.А., Головков В.А. Параметрический синтез амплитудно-фазовых модуляторов с различными вариантами включения нелинейного элемента относительно резистивного четырехполосника//Радиотехника и электроника. - 2013. - № 8. - С. 609-618.
14. Головков А.А., Семенов А.А. Математическое и схемотехническое моделирование амплитудно-фазовых модуляторов с использованием резистивного согласующего устройства при последовательном соединении трехполосного нелинейного элемента и цепи обратной связи//Нелинейный мир. - 2013. - № 6. - Т. 11. - С. 417-422.
15. Под ред. А.И. Перова, В.Н. Харисова. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования - М.: Радиотехника. 2010. – 688 с.

16. Подкорытов А.Н. Высокоточное определение координат потребителя в глобальных навигационных спутниковых системах с использованием уточненной эфемеридно-временной информации//Вестник Московского авиационного института. - М.: МАИ. 2011. - № 3. - Т. 18. - С. 233-239.

17. Подкорытов А.Н. Высокоточное местоопределение в абсолютном режиме в ГНСС с использованием разрешения целочисленной неоднозначности псевдофазовых измерений//Электронный журнал «Труды МАИ». - № 59.

18. Никитин Д.П., Валайтите А.А. Анализ качества высокоточной эфемеридно-временной информации для определения координат низкоорбитальных космических аппаратов//Электросвязь. 2016. № 11. С. 18-24.

19. Никитин Д.П., Валайтите А.А. Алгоритм высокоточного абсолютного местоопределения по сигналам ГНСС для низкоорбитальных космических аппаратов//Электросвязь. - 2016. - № 11. - С. 12-17.

20. Куликов С.В., Гудаев Р.А., Балдычев М.Т., Гайчук Ю.Н. Решение задачи распознавания излучающих объектов на основе подхода к отождествлению их диаграмм направленности//Научные технологии. - 2015. - № 12. - С. 26-30.

21. Рогов Д.А., Бабишкин А.А., Гудаев Р.А., Чистяков С.В. Алгоритм распознавания типа излучающего объекта на основе спектрального портрета в воздушно-космическом пространстве на основании использования спектрального портрета//Труды ВКА имени А.Ф.Можайского. - СПб.: ВКА имени А.Ф.Можайского. - 2016. - Вып. 654. - С. 38-42.

22. Федотов Н.Г. Теория признаков распознавания образов на основе стохастической геометрии и функционального анализа. - М.: Физматлит. 2010. - 304 с.

23. Sobolev V.S., Feshenko A.A. Accurate Cramer-Rao Bounds for a Laser Doppler anemometer//IEEE transactions on instrumentation and measurement. - 2006. - V. 55. - № 2. - P. 659-665.

24. Parkinson B., Spilker J. Global Positioning System: Theory and Practice. V. I, II. Washington, DC: American Institute of Aeronautics and Astronautics. - 1996.

25. Rodrigo F. Leandro. Precise point positioning with GPS a new approach for positioning, atmospheric studies, and signal analysis//Department of Geodesy and Geomatics Engineering University of New Brunswick. 2009.

26. Publication on Geodesy 68ESA's Earth Observation Programmes: Advancing Earth Science Through New Sensing Technology. Ссылка активна на 30.06.2018. URL: <http://earthzine.org/2007/10/29/esas-earth-observation-programmes-advancing-earth-science-through-new-sensing-technology>.

References:

1. Belyakov E.S., Kostrova T.G., Antuf'ev R.V., Kostrov V.V. Ustroistvo ustraneniya neodnoznachnykh izmerenii dal'nosti do tselei, nakhodyashchikhsya za predelami rabochei zony radiolokatsionnoi stantsii. Patent RU №2358284. MPK: G01S 13/08. Opubl. 10.06.2009. Byul. №16. [Belyakov E.S., Kostrova T.G., Antuf'ev R.V., Kostrov V.V. The device for eliminating ambiguous measurements of distance to targets outside the radar's working area. Patent RU No. 2358284. MPK: G01S 13/08. Publ. 10.06.2009. Bul. №16. (in Russ.)]
2. Belyaev B.G., Golubev G.N., Zhibinov V.A., Shchekotov Yu.P. Sposob radiolokatsionnogo obnaruzheniya i soprovozhdeniya ob"ektov i RLS dlya ego realizatsii. Patent RU №2149421. MPK: G01S 13/04. Opubl. 20.05.2000. Byul. №14. [Belyaev B.G., Golubev G.N., Zhibinov V.A., Shchekotov Yu.P. The method of radar detection and tracking of objects and radar for its implementation. Patent RU No. 2149421. MPK: G01S 13/04. Publ. 20.05.2000. Bul. №14. (in Russ.)]
3. Mitrofanov D.G., Silaev N.V., Maiorov D.A., Tuluzakov V.G., Nemtsov A.V. Sposob izmereniya radial'noi skorosti vozduшной tseli v rezhime perestroiki chastoty ot impul'sa k impul'su po sluchainomu zakonu pri ponizhenom otnoshenii signal-shum. Patent RU №2389039. MPK: G01S 13/58. Opubl. 20.05.2010. Byul. №13. [Mitrofanov D.G., Silaev N.V., Maiorov D.A., Tuluzakov V.G., Nemtsov A.V. A method for measuring the radial velocity of an air target in the regime of frequency tuning from pulse to pulse in a random way with a reduced signal-to-noise ratio. Patent RU No. 2389039. MPK: G01S 13/58. Publ. 20.05.2010. Bul. №13 (in Russ.)]
4. Bashev V.V., Grachev O.D., Zachevitskii A.A., Zhablov N.E., Kokuroshnikov S.M., Malkov M.A. Podvizhnaya nazemnaya dvukhkoordinatnaya RLS krugovogo obzora metrovogo diapazona. Patent RU №2341813. MPK: G01S 13/04. Opubl. 20.12.2008. Byul. №35. [Bashev V.V., Grachev O.D., Zachevitskii A.A., Zhablov N.E., Kokuroshnikov S.M., Malkov M.A. Movable terrestrial two-coordinate ra-

- dar system of a circular survey of meter range. Patent RU №2341813. MPK: G01S 13/04. Publ. 20.12.2008. Bul. №35. (in Russ.)]
5. Antashev A.B., Antashev V.B., Antashev D.A., Antashev P.V. Sposob obrabotki signala. Patent RU №2302077. MPK: H04B 1/04. Opubl. 27.06.2007. Byul. №18. [Antashev A.B., Antashev V.B., Antashev D.A., Antashev P.V. Method of signal processing. Patent RU №2302077. MPK: H04B 1/04. Publ. 27.06.2007. Bul. №18. (in Russ.)]
 6. Antashev A.B., Antashev V.B., Antashev D.A., Antashev P.V., Dement'ev R.S. Sposob obnaruzheniya signala. Patent RU №2326401. MPK: G01S 13/34, H04D 7/00. Opubl. 10.06.2008. Byul. №16. [Antashev A.B., Antashev V.B., Antashev D.A., Antashev P.V., Dement'ev R.S. Method of signal detection. Patent RU №2326401. MPK: G01S 13/34, H04D 7/00. Publ. 10.06.2008. Bul. №16. (in Russ.)]
 7. Voprosy perspektivnoi radiolokatsii. Pod red. M. Sokolova. M.: Radiotekhnika; 2003. 512 s. [Questions of perspective radiolocation. Ed. M. Sokolov. M.: Radiotekhnika; 2003. 512 p. (in Russ.)]
 8. Perunov Yu.M., Kupriyanov A.I. Radioelektronnaya bor'ba: radiotekhnicheskaya razvedka. M.: Vuzovskaya kniga; 2016. 190 s. [Perunov Yu.M., Kupriyanov A.I. Electronic warfare: radio technical intelligence. M.: Vuzovskaya kniga; 2016. 190 p. (in Russ.)]
 9. Radzievskii V.G., Trifonov P.A. Obrabotka sverkhshirokopolosnykh signalov i pomekh. M.: Radiotekhnika; 2009. 288 s. [Radzievskii V.G., Trifonov P.A. Processing ultra-wideband signals and interferences. M.: Radiotekhnika; 2009. 288 p. (in Russ.)]
 10. Panychev S.N., Pitolin V.M., Samotsvet N.A. Universal'nyi pokazatel' dlya otsenki effektivnosti maskiruyushchikh i imitatsionnykh pomekh. Radiotekhnika. 2016;6:26-30. [Panychev S.N., Pitolin V.M., Samotsvet N.A. Universal indicator for assessing the effectiveness of masking and imitating interferences. Radioengineering. 2016;6:26-30. (in Russ.)]
 11. Litvinov N.N., Lavrent'ev A.M. Analiz. Vozmozhnosti maskirovki zondiruyushchikh signalov radiolokatsionnykh stantsii gruppirovki protivovozdushnoi oborony. Vestnik Vozdushno-kosmicheskoi oborony. 2017;1(13):38-43. [Litvinov N.N., Lavrent'ev A.M. Possibilities of masking sounding signals of radar stations of air defense grouping. Aerospace Defense Herald. 2017;1(13):38-43. (in Russ.)]
 12. Golovkov A.A., Minakov V.G. Sintez soglasuyushche-fil'truyushchikh ustroystv amplitudno-fazovykh manipulyatorov pri vklyuchenii upravlyaemogo elementa posledovatel'no istochniku signala. Telekommunikatsii. 2005;3:33-37. [Golovkov A.A., Minakov V.G. Synthesis of matching-filtering devices of amplitude-phase manipulators when the controlled element is switched on in series with the signal source. Telecommunications. 2005;3:33-37. (in Russ.)]
 13. Golovkov A.A., Golovkov V.A. Parametricheskii sintez amplitudno-fazovykh modulyatorov s razlichnymi variantami vklyucheniya nelineinogo elementa otnositel'no rezistivnogo chetyrekhpol'yusnika. Radiotekhnika i elektronika. 2013;8:609-618. [Golovkov A.A., Golovkov V.A. Parametric synthesis of amplitude-phase modulators with different variants of switching of a nonlinear element with respect to a resistive four-terminal network. Radiotekhnika i elektronika. 2013;8:609-618. (in Russ.)]
 14. Golovkov A.A., Semenov A.A. Matematicheskoe i skhemotekhnicheskoe modelirovanie amplitudno-fazovykh modulyatorov s ispol'zovaniem rezistivnogo soglasuyushchego ustroystva pri posledovatel'nom soedinenii trekhpol'yusnogo nelineinogo elementa i tsepi obratnoi svyazi. Nelineinyi mir. 2013;6(11):417-422. [Golovkov A.A., Semenov A.A. Mathematical and circuit simulation of amplitude-phase modulators using a resistive matching device with a series connection of a three-pole nonlinear element and a feedback loop. Nonlinear World. 2013;6(11):417-422. (in Russ.)]
 15. GLONASS. Printsipy postroeniya i funktsionirovaniya. Pod red. A.I. Perova, V.N. Kharisova. M.: Radiotekhnika; 2010. 688 s. [GLONASS. Principles of construction and functioning. Eds. A.I. Perov, V.N. Harisov. M.: Radiotekhnika; 2010. 688 p. (in Russ.)]
 16. Podkorytov A.N. Vysokotochnoe opredelenie koordinat potrebitelya v global'nykh navigatsionnykh sputnikovykh sistemakh s ispol'zovaniem utochnennoi efemeridno-vremennoi informatsii. Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta. 2011;3(18):233-239. [Podkorytov A.N. High-precision determination of customer coordinates in global navigation satellite systems using refined ephemeris time information. Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta. 2011;3(18):233-239. (in Russ.)]
 17. Podkorytov A.N. Vysokotochnoe mestoopredelenie v absolyutnom rezhime v GNSS s ispol'zovaniem razresheniya tselochislennoi neodnoznachnosti psevdofazovykh izmerenii. Trudy MAI. № 59. [Podkorytov A.N. High-precision positioning in absolute mode in GNSS using the resolution of integer ambiguity of pseudo-phase measurements. Trudy MAI. № 59. (in Russ.)]
 18. Nikitin D.P., Valaitite A.A. Analiz kachestva vysokotochnoi efemeridno-vremennoi informatsii dlya opredeleniya koordinat nizkoorbital'nykh kosmicheskikh apparatov. Elektrosvyaz'. 2016;11:18-24. [Ni-

- kitin D.P., Valaitite A.A. Analysis of the quality of high-precision ephemeris time information for determining the coordinates of low orbital spacecraft. *Electrosvyaz*. 2016;11:18-24. (in Russ.)]
19. Nikitin D.P., Valaitite A.A. Algoritm vysokotochnogo absolyutnogo mestoopredeleniya po signalam GNSS dlya nizkoorbital'nykh kosmicheskikh apparatov. *Elektrosvyaz'*. 2016;11:12-17. [Nikitin D.P., Valaitite A.A. Algorithm of high-precision absolute location based on GNSS signals for low-orbit spacecraft. *Elektrosvyaz*. 2016;11:12-17. (in Russ.)]
 20. Kulikov S.V., Gudaev R.A., Baldychev M.T., Gaichuk Yu.N. Reshenie zadachi raspoznavaniya izluchayushchikh ob"ektov na osnove podkhoda k otozhdestvleniyu ikh diagramm napravlenosti. *Naukoemkie tekhnologii*. 2015;12:26-30. [Kulikov S.V., Gudaev R.A., Baldychev M.T., Gaichuk Yu.N. The solution of the problem of recognition of radiating objects on the basis of the approach to the identification of their directivity diagrams. *Science Intensive Technologies*. 2015;12:26-30. (in Russ.)]
 21. Rogov D.A., Babishkin A.A., Gudaev R.A., Chistyakov S.V. Algoritm raspoznavaniya tipa izluchayushchego ob"ekta na osnove spektral'nogo portreta v vozdušno-kosmicheskom prostranstve na osnovanii ispol'zovaniya spektral'nogo portreta. *Trudy VKA imeni A.F.Mozhaiskogo*. 2016;654:38-42. [Rogov D.A., Babishkin A.A., Gudaev R.A., Chistyakov S.V. Algorithm for recognizing the type of a radiating object based on a spectral portrait in airspace based on the use of a spectral portrait. *Trudy VKA imeni A.F.Mozhaiskogo*. 2016;654:38-42. (in Russ.)]
 22. Fedotov N.G. Teoriya priznakov raspoznavaniya obrazov na osnove stokhasticheskoi geometrii i funktsional'nogo analiza. M.: Fizmatlit; 2010. 304 s. [Fedotov N.G. Theory of features of pattern recognition based on stochastic geometry and functional analysis. M.: Fizmatlit; 2010. 304 p. (in Russ.)]
 23. Sobolev V.S., Feshenko A.A. Accurate Cramer-Rao bounds for a Laser Doppler anemometer. *IEEE transactions on instrumentation and measurement*. 2006;55(2):659-665.
 24. Parkinson B., Spilker J. *Global Positioning System: Theory and Practice*. V. I, II. Washington, DC: American Institute of Aeronautics and Astronautics; 1996.
 25. Leandro R.F. *Precise point positioning with GPS: a new approach for positioning, atmospheric studies, and signal analysis*. Department of Geodesy and Geomatics Engineering, University of New Brunswick. 2009.
 26. Publication on Geodesy 68ESA's Earth Observation Programmes: Advancing Earth Science through New Sensing Technology. (Access date 30.06.2018). URL: <http://earthzine.org/2007/10/29/esas-earth-observation-programmes-advancing-earth-science-through-new-sensing-technology>.

Сведения об авторах:

Адалаева Патимат Шамильевна – аспирант, кафедра радиотехники, телекоммуникаций и микроэлектроники.

Айгумов Тимур Гаджиевич – кандидат экономических наук, доцент, кафедра программного обеспечения, вычислительной техники и автоматизированных систем.

Магомедова Сабина Владимировна – аспирант, кафедра радиотехники, телекоммуникаций и микроэлектроники

Челушкина Татьяна Алексеевна – кандидат технических наук, старший преподаватель, кафедра теоретической и общей электротехники.

Information about the authors.

Patimat Sh.Adalaeva – Graduate Student, Department of Radio Engineering, Telecommunications and Microelectronics.

Timur G.Aigumov – Cand. Sci. (Economics), Assoc. Prof., Department of Software, Computing and Automated Systems.

Sabina V. Magomedova – Graduate Student, Department of Radio Engineering, Telecommunications and Microelectronics.

Tatyana A.Chelushkina – Cand. Sci. (Technical), Senior Lecturer, Department of Theoretical and General Electrical Engineering.

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 23.03.2018.

Принята в печать 04.05.2018.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 23.03.2018.

Accepted for publication 04.05.2018.

Для цитирования: Бадалян Н.П., Колесник Г.П., Соловьёва С.Г., Чащин Е.А. Продольная компенсация реактивной мощности в короткой сети электродуговой печи. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2018;45 (2):42-51. DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-2-42-51

For citation: Badalyan N.P., Kolesnik G.P., Solovyova S.G., Chashchin E.A. Series compensation of reactive power in a low-voltage circuit of the electric arc furnace. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2018; 45(2):42-51. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-2-42-51

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.311.001

DOI: 10.21822/2073-6185-2018-45-2-42-51

ПРОДОЛЬНАЯ КОМПЕНСАЦИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В КОРОТКОЙ СЕТИ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ ПЕЧИ

Бадалян Н.П.¹, Колесник Г.П.², Соловьёва С.Г.³, Чащин Е.А.⁴

¹⁻³Владимирский государственный технический университет имени А.Г.
и Н.Г. Столетовых,

¹⁻³ 600000, г. Владимир, ул. Горького 87, Россия,

⁴ Ковровская государственная технологическая академия имени В.А. Дегтярева,

⁴ 601910, г. Ковров, Владимирская обл., ул. Маяковского, 19, Россия,

¹⁻³e-mail: norayrbadalyan@mail.ru, ⁴e-mail: kanircha@list.ru

Резюме: Цель. Целью исследования является повышение энергетической эффективности в системе электроснабжения и короткой сети дуговой печи. В соответствии с целью исследования поставлена актуальная задача определения емкости конденсаторов для компенсации реактивной мощности и выбора рационального места их установки. **Метод.** В рамках ранее разработанной концепции изменения параметров трансформатора продольного включения в схеме продольной компенсации рассматриваются вопросы эффективного использования и потребления электрической энергии линейной нагрузкой большой мощности при синусоидальном режиме. Принимаем в работе для повышения эффективности дуговой печи установку статических компенсаторов с прямым методом компенсации с автоматическим управлением, предусматривающую 12 ступеней регулирования. Рассмотрена возможность повышения эффективности электропитания дуговых печей переменного тока компенсацией реактивной мощности в короткой линии. **Результат.** Обоснована целесообразность применения схемы продольной компенсации реактивной мощности с включением конденсаторов в обмотку высшего напряжения трансформатора продольного включения. **Вывод.** В работе показано, что для эффективного использования и потребления электрической энергии линейной нагрузкой большой мощности при синусоидальном режиме, целесообразно применять схемы продольной компенсации реактивной мощности с включением конденсаторов в обмотку высшего напряжения трансформатора продольного включения. Это позволяет увеличить коэффициент полезного действия устройств электропитания электродуговых печей, уменьшить потери мощности в системе электроснабжения и короткой сети печи в 1,6 раз и снизить в 1,36 раз полную нагрузку в силовом трансформаторе.

Ключевые слова: энергоэффективность, переменный ток, реактивная мощность, продольная компенсация, компенсирующая емкость, вольтодобавка, коэффициент мощности, электродуговая печь, короткая сеть, трансформатор

TECHNICAL SCIENCE
POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL MECHANICAL ENGINEERING

SERIES COMPENSATION OF REACTIVE POWER IN A LOW-VOLTAGE CIRCUIT OF
THE ELECTRIC ARC FURNACE

Norayr P.Badalyan¹, Grigory P.Kolesnik², Sofia G.Solovyova³, Yevgeny A.Chaschin⁴

¹⁻³ Alexander and Nikolay Stoletovs Vladimir State University,

¹⁻³87 Gorkog Str., Vladimir 600000, Russia,

⁴ V.A. Degtyarev Kovrov State Technological Academy,

⁴19 Mayakovskogo Str., Kovrov 601910, Vladimir region, Russia,

¹⁻³e-mail: norayrbadalyan@mail.ru, ⁴e-mail: kanircha@list.ru

Abstract Objectives The aim of the study is to increase the energy efficiency of an arc furnace's power supply system and low-voltage circuit. According to the aim of the research, the relevant tasks of determining the capacitor capacity for reactive power compensation and selecting a rational location for its installation are posed. **Methods** Within the framework of the previously developed concept of changing the parameters of the switching transformer in the series compensation circuit, issues of efficient use and consumption of electrical energy by a high power linear load under sinusoidal mode are considered. The installation of static compensators using a direct compensation method with automatic control including 12 stages of regulation is proposed as a means of increasing the efficiency of the arc furnace. Challenges involved in increasing the efficiency of electric power supply to alternating current arc furnaces using compensating reactive power in a low-voltage circuit are considered. **Results** The viability of using the series compensation circuit of reactive power with the switching of capacitors in the winding of the higher voltage of the series switching transformer is demonstrated. **Conclusion** It is shown that for efficient use and consumption of electric energy by high-power linear load under sinusoidal conditions, it is advisable to apply the series compensation of reactive power with the switching of capacitors in the winding of the higher voltage of the series switching transformer. This makes it possible to increase the efficiency coefficient of electric arc furnace power supply devices by reducing the power losses in the power supply system and in the furnace low-voltage circuit by 1.6 times, as well as reducing the total load in the power transformer by 1.36 times.

Keywords: energy efficiency, alternating current, reactive power, series compensation, compensating capacity, accessory voltage, power coefficient, electric arc furnace, low-voltage circuit, transformer

Введение. В настоящее время, в литейном производстве стали широко используются электрические плавильные печи [1], основными из которых являются индукционные – канальные и тигельные, а также дуговые печи переменного тока.

Основным недостатком индукционных и тигельных печей является то, что они технологически пассивны, поэтому качественный металл при их использовании можно получить только из высококачественной шихты, что позволяет получать высокое качество отливок только при небольшом объеме производства, а при увеличении объемов производства существенно повышает себестоимость металлургического передела.

Кроме того, индукционная плавка, при которой вокруг или под металлом расположены водоохлаждаемые элементы, изолированные от расплава тонким слоем футеровки, является потенциально взрывоопасной [2]. Альтернативой применению индукционных печей, с точки зрения промышленной безопасности и технологической перспективности, является использование взрывобезопасных и технологически активных дуговых печей переменного тока, позволяющие получать высококачественный металл из шихты практически любого качества [3]. Однако ряд недостатков этих печей затрудняет их эксплуатацию, основным из которых является работа с относительно низким коэффициентом мощности, что приводит к большим потерям энергии в короткой сети. Это делает актуальным решение вопроса повышения энергетической эффективности в системе электроснабжения и короткой сети дуговой печи.

Постановка задачи. Известно, что в цепях переменного тока при линейной нагрузке эффективность использования и потребления электрической энергии в установившемся режиме в основном зависят от уровня реактивной мощности, коэффициента полезного действия устройства и $\cos\varphi$, характеризующего уровень потребления реактивной мощности [4]. Поэтому практически основным фактором, позволяющим решить вопрос энергосбережения и повышения энергоэффективности использования дуговых печей переменного тока, является снижение потребления реактивной мощности.

Статья является продолжением работы [5], в которой исследованы вопросы изменения параметров трансформатора продольного включения в схеме продольной компенсации и решаются вопросы оценки приращения значений модуля и аргумента реального коэффициента трансформации в зависимости от значения компенсирующей емкости, напряжения вольтодобавки и рабочего тока электрода. Это делает актуальным исследование вопроса повышения эффективности использования и потребления электрической энергии линейной нагрузкой большой мощности при сиусоидальном режиме.

Методы исследования. Решим поставленную актуальную задачу определения емкости конденсаторов для компенсации реактивной мощности и выбора рационального места их установки.

Энергоэффективность дуговой печи. Известно большое количество решений в направлении энергосбережения для вопросов, связанных с эксплуатацией электрооборудования в номинальном режиме, когда ток для реальных потребителей, как правило, изменяется в диапазоне 5-10% от тока короткого замыкания [6]. Однако эксплуатация наиболее распространенных в промышленности круглых трехфазных ферросплавных дуговых печей с расположением электродов треугольником (табл. 1), отличается большим технологическим диапазоном изменения мощностей от режима холостого хода до режима короткого замыкания и низким значением коэффициента мощности, составляющими 0,7 и менее. Неспокоеное горение дуги в этом случае вызвано особенностями технологического процесса, связанными с многочисленными обрывами дуги при переходе дуги с одной шихты на другие, а так же эксплуатационными короткими замыканиями, вызываемые обвалами и перемещениями проводящих частей шихты. Поэтому решение вопроса повышения энергоэффективности и энергосбережения затруднено.

Таблица 1. Технические данные ферросплавных печей
Table 1. Technical data of Ferroalloy furnaces

Технические данные	Тип печи						
	ПКО-2,5	ПКО-3,5	ПКО-10,5	ПКО-16,5 ПКЗ-16,5	ПКЗ-24	ПКЗ-33	ПКЗ-48
Мощность S , кВА	2500	3500	10500	16500	24000	33000	48000
Вторичное напряжение, В	178 – 89	371–260	250 – 100	210 – 132	245 – 155	250 – 130	238,5 – 137
Максимальный ток, кА	13,0	13,0	38,4	59,0	71,0	87,0	111,8
Диаметр электрода $d_э$, мм	300–450	300–450	800	1200	1200	1500	2800x650
Диаметр ванны $d_в$, мм	2700	2700	4000	6200/6700	7200	8700	20340x6000
Глубина ванны h , мм	1200	1300	1700	2300	2600	3000	2850

Современные энергосберегающие технологии в промышленности, предполагают широкое использование конденсаторные батарей для компенсации реактивной мощности [7], отличающихся малым уровнем потерь активной мощности, составляющей 3-5 Вт на 1 квар и возможностью установки батарей вблизи электроприёмников. При использовании конденсаторных установок с автоматическим управлением возможна компенсация реактивной мощности прямым и косвенным методами.

Статические управляемые компенсаторы при прямом методе компенсации включают кон-

денсаторные батареи с тиристорными переключателями, при этом необходимую реактивную мощность генерируют конденсаторы. При косвенном методе компенсации постоянная реактивная мощность генерируется с помощью конденсаторов, которые входят в состав фильтров высших гармоник, а дополнительное регулирование реактивной мощности осуществляется с помощью фазоуправляемых тиристорных ключей и реакторов. Статические управляемые компенсаторы обладают более высоким быстродействием и могут быть использованы в схемах электроснабжения с резкопеременной нагрузкой.

Принимаем в работе для повышения эффективности дуговой печи установку статических компенсаторов с прямым методом компенсации с автоматическим управлением, предусматривающей 12 ступеней регулирования. В общем случае, для оценки энергоэффективности электрооборудования, с учетом несинусоидальных искажений, удобно использовать энергетический коэффициент [6,8]:

$$k_y = \frac{P_{\dot{a}\dot{a}\dot{o}}}{P_{\dot{a}\dot{o}}} \frac{I_1}{I} \cos \varphi, \quad (1)$$

где $P_{\text{вых}}, P_{\text{вх}}$ – активные выходная и входная мощности; I_1, I – действующие значения первой гармоники тока и несинусоидального периодического тока; $\cos \varphi$ – коэффициент мощности.

Коэффициент мощности (1) показывает фазовый сдвиг между первыми гармониками напряжения и тока:

$$\cos \varphi = P_{\dot{a}\dot{o}} / \sqrt{P_{\dot{a}\dot{o}}^2 + Q^2 + D^2}, \quad (2)$$

где Q – реактивная мощность; D – мощность небаланса.

В дальнейших расчетах принимаем влияние высших гармоник пренебрежимо малым, $D = 0$.

Компенсация реактивной мощности. Короткая сеть дуговой ферросплавной печи, как правило, включает в себя ошиновку в трансформаторной камере, гибкую кабельную гирлянду, трубошину, электрододержатель и электрод [9]. Электрический баланс мощной ферросплавной печи показывает [1], что потери в короткой сети составляют около 35% общих потерь или 7-15% подведенной мощности, причем значение потерь токопроводящей сети при больших токах возрастает сильнее, чем значение полезной мощности печи. Поэтому расчеты короткой сети выполняют обычно по режиму, определяемому превышением полезной мощности над потерями электроэнергии в короткой сети при достаточно высоком $\cos \varphi$.

Однако при таком подходе, обеспечение удовлетворительных электрических характеристик дуговой печи при заданном рабочем напряжении все более затрудняется по мере увеличения мощности печи ввиду роста индуктивного сопротивления контура. Так же следует отметить, что типовые мероприятия, направленные на уменьшение активного и реактивного сопротивления короткой сети, базируются в основном на выполнении требований к электродинамической и термической устойчивости токоведущих проводников, что позволяет определить рациональное соотношение между длиной, взаимному расположению и сечению токопровода [1]. Однако подобный подход не рассматривает условия компенсации реактивной мощности.

Конструктивные особенности типовых серийно выпускаемых дуговых печей (табл. 1) содержащих трехобмоточный трансформатор, предполагают возможным выполнять мероприятия по повышению коэффициента мощности системы электроснабжения электродуговой печи, как на стороне высшего напряжения (ВН), так и на стороне среднего (СН) или низшего (НН) напряжения. Реализация мероприятий по энергосбережению компенсацией реактивной мощности на стороне ВН позволяет реализовать достижение основных требований к коэффициенту мощности, но не решает проблему потерь мощности в короткой сети. Кроме того, с увеличением мощности электродуговой печи увеличивается и питающее напряжение, что значительно усложняет решение проблемы компенсации реактивной мощности. Техническая реализация компенсирующей установки на стороне НН связана с увеличением габаритных размеров и усложнением монтажа короткой сети из-за больших значений тока компенсации НН в несколько десятков тысяч ампер. Это делает нецелесообразным повышение эффективности дуговой печи на стороне НН.

Обсуждение результатов. Проведенный анализ показал, что наиболее целесообразной ока-

зывается компенсация реактивной мощности на стороне СН, которая может быть конструктивно выполнена либо параллельно, либо последовательно. При параллельной компенсации реактивной мощности на стороне СН, так же как при компенсации на стороне ВН, не решается вопрос потери мощности в короткой сети.

Рассмотрим последовательную компенсацию реактивной мощности на стороне СН, иначе продольную компенсацию. При продольной компенсации, поскольку компенсационные электрические емкости оказываются включенными последовательно с нагрузкой в главном контуре, реактивная мощность конденсатора зависит от величины протекающего через плавящийся электрод дуговой печи тока и, следовательно, меняется с колебанием реактивной мощности под нагрузкой. Это позволяет выполнять компенсацию реактивной мощности в реальном времени без изменения напряжения рабочей шины. Следует отметить, что при продольной компенсации, по сравнению с параллельной компенсацией, может повышаться, за счет напряжения вольтодобавки, вторичное напряжение печного трансформатора. Последнее может увеличивать активную мощность, потребляемую электродуговой печью.

Рассмотрим упрощенную схему включения компенсирующей емкости C (в однофазном приближении) в обмотку СН трехобмоточного трансформатора T_1 последовательно с обмоткой высшего напряжения вольтодобавочного трансформатора T_2 без дополнительных элементов защиты от коммутационных перенапряжений на конденсаторе (рис. 1).

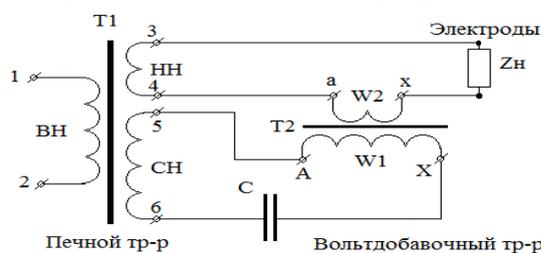


Рис. 1. Схема включения компенсирующей емкости в обмотку СН трех-обмоточного трансформатора

Fig. 1. The scheme of inclusion of the compensating capacity in the winding SN three-winding transformer

Оценим влияние компенсирующей емкости C на режим работы электродуговой ферросплавной печи. Пренебрегая, с целью упрощения, особенностями расположения обмоток ВН, СН и НН на стержнях трехобмоточного печного трансформатора, составим схему замещения установки продольной компенсации (рис. 2).

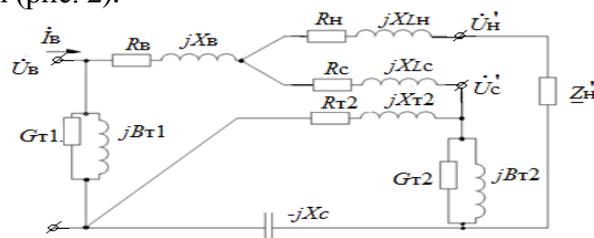


Рис. 2. Схема замещения установки продольной компенсации с компенсирующей емкостью на стороне СН

Fig. 2. Equivalent circuit of installation of the longitudinal compensation with the compensating capacitance on the side of SN

В полученной схеме (рис. 2) схему замещения трансформатора T_1 представим трехлучевой звездой, а трансформатора T_2 – Г-образной прямой схемой замещения без учета трансформации (рис. 1). Ветви намагничивания включаем на первичных зажимах трансформаторов (зажимы 1-2 для T_1 и зажимы А-Х для T_2).

Параметры схемы замещения трехобмоточного трансформатора T_1 (рис. 2) – активные и реактивные сопротивления обмоток ВН, СН и НН приведены к напряжению первичной обмотки трансформатора. Ветвь намагничивания включена на первичных зажимах схемы замещения и ее параметры определяются так же, как и для двухобмоточных трансформаторов [10- 11].

Реактивные сопротивления X_c и X_n соответственно обмоток СН и НН расположены меж-

ду двумя другими обмотками, из-за их взаимного влияния, и имеют значения близкие к нулю, либо пренебрежимо малые отрицательные значение. В работе принимаем их равными нулю.

В паспортных данных трехобмоточного трансформатора как правило приводят либо три нормированных, т.е. приведенных к номинальной мощности, значения напряжения короткого замыкания [11] $U_{кв}, U_{кс}, U_{кн}$ и одно $\Delta P_{кв-с}$ или $\Delta P_{кв-н}$, либо три значения потерь мощности короткого замыкания $\Delta P_{кв-н}, \Delta P_{кв-с}, \Delta P_{кс-н}$.

Для трехобмоточного трансформатора с одинаковыми мощностями обмоток, суммарные потери короткого замыкания на пару обмоток поровну распределяются между соответствующими обмотками. Таким образом, активные сопротивления лучей схемы замещения (рис. 2) с учетом паспортных данных удобно определить:

$$R_a = R_n = R_l = \frac{1}{2} \Delta P_{\Sigma} U_m^2 / S_m^2 \quad (3)$$

При расположении обмотки СН между обмотками ВН и НН вкладом реактивного сопротивления можно пренебречь $X_{LC} = 0$, а при расположении обмотки НН между обмотками ВН и СН можно пренебречь вкладом $X_{LN} = 0$. С учетом сделанных допущений и упрощений расчетная схема замещения принимает вид (рис. 3).

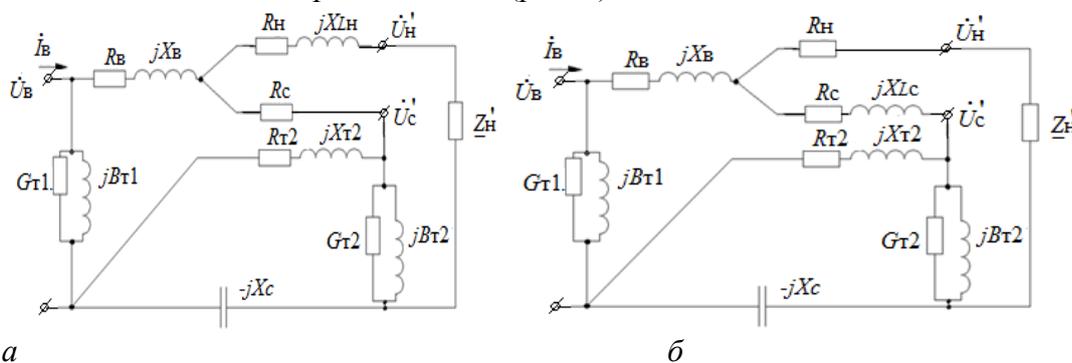


Рис. 3. Схема замещения установки продольной компенсации: а - с компенсирующей емкостью на стороне СН при $X_{LC} = 0$. б - с компенсирующей емкостью на стороне СН при $X_{LN} = 0$

Fig. 3. Equivalent circuit of the longitudinal compensation unit: a-with compensating capacity on the side of SN at $X_{LC} = 0$. b-with compensating capacity on the CH side at $X_{LN} = 0$

В схеме короткой сети, двухобмоточный трансформатор T_2 (рис. 1) представлен простой Г-образной схемой замещения – прямой с подключением ветви проводимостей со стороны ВН. Однако следует отметить, что в рассматриваемой схеме, это напряжение следует отнести к СН трансформатора T_1 , поскольку трансформатор T_2 является понижающим. Таким образом, в расчетах параметры элементов первичной обмотки трансформатора T_2 и ее нагрузка приведены к обмотке НН.

Известно, что в полнофазном режиме двухобмоточного трансформатора потери мощности в трех фазах равны утроенному значению фазных потерь [10], т. е.

$$\Delta P_{\Sigma} = 3\Delta P_{\Sigma\phi} \quad (4)$$

Соответственно, линейное напряжение и номинальная мощность трансформатора составляют:

$$U_m = \sqrt{3} \tilde{A} U_{\Sigma\phi}, \quad S_m = 3\Delta P_{\Sigma\phi} \quad (5)$$

Тогда активное сопротивление обмоток двухобмоточного трансформатора можно определить по паспортным данным, Ом:

$$R_{\Sigma 2} = \Delta P_{\Sigma} U_m^2 / S_m^2 \times 10^{-3} \quad (6)$$

Принимая, что индуктивное сопротивление трансформатора X_{T2} зависит от напряжения короткого замыкания $U_{к}$, можно видеть, что полное сопротивление трансформатора с учетом выражения (6), Ом:

$$Z_{T2} = R_{\Sigma 2} + jX_{T2} = \frac{U_{\Sigma}}{100} \times \frac{U_m^2}{S_m^2} \quad (7)$$

Для оценки влияния компенсирующей емкости на режим работы электродуговой ферросплавной печи при расположении обмотки СН между обмотками ВН и НН необходимо определить входной ток компенсирующей установки I_B или ток нагрузки на стороне НН по схеме замещения (рис. 3, б).

Параметры элементов схемы по рис. 2 могут быть определены по паспортным данным трансформаторов T_1 и T_2 с учетом соотношений (1-7): потерям холостого хода и короткого замыкания, току холостого хода и напряжению короткого замыкания, номинальному напряжению и номинальной полной мощности, значению коэффициента трансформации идеального трансформатора. Без учета влияния ветвей намагничивания трансформаторов T_1 и T_2 схема замещения рис. 3 принимает вид (рис. 4).

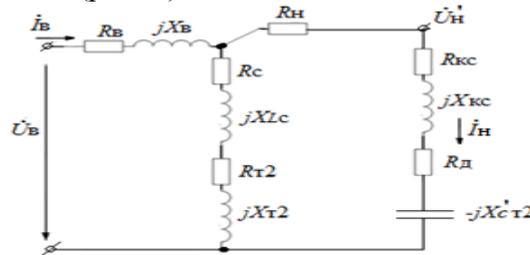


Рис. 4. Схема замещения компенсирующей установки при исключении ветвей намагничивания

Fig. 4. An equivalent circuit of the compensation unit to the exclusion of the branches of the magnetization

Схема замещения короткой сети ферросплавной электродуговой печи с нагрузочным сопротивлением электрической дуги $R'_д$, приведенному к обмотке высшего напряжения трансформатора T_1 , активным $R_{кc}$ и реактивным $X_{кc}$ сопротивлениями короткой сети, сопротивлением компенсирующей емкости $X'_{cт2}$, приведенным к обмотке НН трансформатора T_2 , включенных на НН трансформатора T_1 , показана на рис. 5, где элемент R' это сумма активных сопротивлений обмотки НН трансформатора T_1 , короткой сети и электрической дуги.

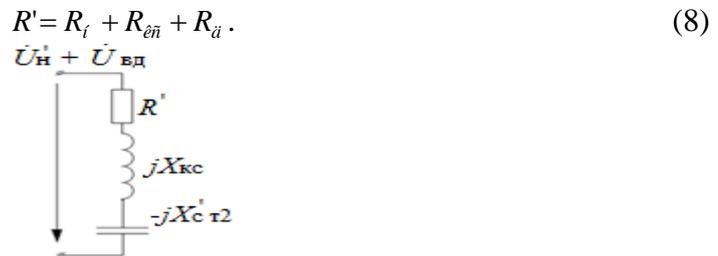


Рис. 5. Схема замещения короткой сети с нагрузочным сопротивлением электрической дуги и сопротивлением компенсирующей емкости

Fig. 5. Equivalent circuit of a short network with load resistance of an electric arc and resistance of compensating capacity

Следует отметить, что при больших токах электрическую дугу при инженерных расчетах с достаточной степенью точности целесообразно моделировать активным неизменным во времени сопротивлением, поскольку её динамическая характеристика линейна и ток дуги пропорционален напряжению. При этом ток дуги и напряжение сохраняют синусоидальную форму. Тогда напряжение на нагрузке определяется суммой напряжения НН \dot{U}'_H трансформатора T_1 и напряжения НН трансформатора T_2 (напряжения вольтодобавки $\dot{U}_{\text{вд}}$). С учетом вышеизложенного, ток нагрузки можно определить:

$$I_t = \frac{\dot{U}'_t \pm \dot{U}_{\text{вд}}}{R' + jX_{\text{en}} - jX'_{\text{cт2}}}. \quad (9)$$

Таким образом, реактивную мощность компенсирующей емкости для заданного типа дуговой ферросплавной печи с известными характеристиками печного трансформатора можно вычислить по параметрам рабочего режима обмотки СН $U_c, I_c, \cos\phi_1$, без учета нагрузочных потерь активной мощности в короткой сети и трансформаторах, и значению реализуемого ко-

ээффициента мощности $\cos\varphi_2$ после компенсации:

$$Q_e = UI \cos\varphi_1 (tg\varphi_1 - tg\varphi_2), \quad (10)$$

или емкость компенсирующего конденсатора (рис. 2), мкФ:

$$C = Q_e / 2\pi f U^2 \times 10^3, \quad (11)$$

где U – напряжение на зажимах конденсатора, кВ; f – частота питающей сети, Гц; Q_k – реактивная мощность конденсатора, кВАр.

Видно, что полученные формулы (10, 11) соответствуют каноническому виду [12], что подтверждает справедливость сделанных допущений и выводов. Результаты расчета на примере ферросплавной печи ПКЗ-48 (табл. 1) по формулам (3-11) в соответствии со схемой замещения (рис. 5) приведены на рис. 6. Для приведенного примера принимаем напряжение U равным 99 В, а сопротивление линии R составит 0,002 Ом. Видно, что полная нагрузка в короткой линии до компенсации составляет:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{3.5^2 + 3.5^2} = 4.95 \text{ МВА}$$

Тогда ток в короткой линии до компенсации можно оценить:

$$I = S / \sqrt{3} U = 4.59 \cdot 10^6 / \sqrt{3} \cdot 99 = 28870 \text{ А}$$

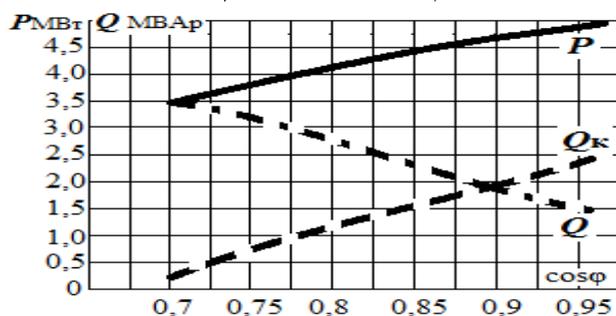


Рис. 6. Графики зависимости активной и реактивной мощностей ферросплавной электродуговой печи от коэффициента мощности: рабочие параметры режима $U=99 \text{ В}$

Fig. 6. Graphs of the dependence of the active and reactive power of the Ferroalloy electric arc furnace on the power factor: operating parameters of the mode $U=99 \text{ V}$

При этом активные потери в линии составляют:

$$\Delta P = I^2 R = 28870^2 \cdot 0.002 \approx 1.65 \text{ МВт}$$

Для компенсации реактивной мощности в короткой линии установлена компенсаторная установка мощностью $Q_k=2,5 \text{ МВАр}$. В этом случае нагрузка линии после компенсации составит:

$$S_e = \sqrt{P^2 + (Q - Q_e)^2} = \sqrt{3.5^2 + 1.0^2} = 3.64 \text{ МВА},$$

ток, протекающий в короткой в линии:

$$I_e = S_e / \sqrt{3} U = 3.64 \cdot 10^6 / \sqrt{3} \cdot 99 = 21230 \text{ А}, \text{ а активные потери в линии}$$

$$\Delta P_e = I_e^2 R = 21230^2 \cdot 0.002 \approx 0.89 \text{ МВт}.$$

Таким образом, видно, что ток в короткой линии с применением компенсаторной установки уменьшается в 1,46 раз, активные потери со стороны короткой линии снизились на 27%, а полная нагрузка трансформатора уменьшилась с 4,95 МВА до 3,64 МВА.

Оценим изменение уровня потерь в трансформаторе при компенсации реактивной мощности по предложенному способу со стороны короткой линии.

$$\Delta W = \Delta P_{\text{дд}} T_{\text{д}} + \Delta P_{\text{кз}} \frac{S^2}{S_{\text{ном}}^2} T, \quad (12)$$

где $\Delta P_{\text{дд}}$ – потери холостого хода; $\Delta P_{\text{кз}}$ – потери короткого замыкания; $S, S_{\text{ном}}$ – мощность загрузки трансформатора и его номинальная мощность соответственно; $T_{\text{д}}=8760 \text{ час.}$ – продолжительность работы трансформатора в течение года; T – продолжительность работы трансформатора под нагрузкой.

Согласно ГОСТ 11677-85 уровень потерь $\Delta P_{\text{дд}}$ и $\Delta P_{\text{кз}}$ нормируются в зависимости от $S_{\text{ном}}$

трансформатора. Принимаем, для ориентировочной оценки эффективности энергосбережения, что номинальная мощность составляет 4,8 МВА, а мощность потерь холостого хода и короткого составит 8 и 37 кВт соответственно. Тогда результаты расчета по формуле (12) показывают, что при трехфазном режиме работы ($T = 8400$ час.), потери в трансформаторе до компенсации реактивной мощности составят 375 кВт·час и уменьшаться в 1,6 раз до уровня 235 кВт·час после компенсации по предложенному способу.

Вывод. В работе показано, что для эффективного использования и потребления электрической энергии линейной нагрузкой большой мощности при синусоидальном режиме, целесообразно применять схемы продольной компенсации реактивной мощности с включением конденсаторов в обмотку высшего напряжения трансформатора продольного включения. Что позволяет увеличить коэффициент полезного действия устройств электропитания электродуговых печей, уменьшить потери мощности в системе электроснабжения и короткой сети печи в 1,6 раз и снизить в 1,36 раз полную нагрузку в силовом трансформаторе.

Библиографический список:

1. Мортимер Д. Х. Индукционная плавка: технологии будущего существуют сегодня // *Электротехнология*. 2000, № 10. С. 23–35.
2. Афонаскин А.В. Результаты первого этапа освоения дугового плавильного агрегата постоянного тока нового поколения на ОАО "Курганмашзавод" // *Литейное производство*. 2000, № 11. С. 20–23.
3. Малиновский В. С., Дубинская Ф. Е. Технико-экономические и экологические аспекты альтернативных технологий плавки металла в дуговых печах // *Электротехнология*. 1999, № 3. С. 8–16.
4. Бадалян Н.П., Чашин Е.А. Построение математической модели допустимого установившегося режима электроэнергетической системы // *Вестник ИГЭУ*. 2012, №3. С. 43–47.
5. Бадалян Н.П., Колесник Г.П., Соловьева С.Г. Изменение параметров трансформатора продольного включения в схеме продольной компенсации // *Вестник НПУА*. 2017, № 2. С. 33–42.
6. Кудрин Б.И., Минеев А.Р. *Электрооборудование промышленности*. М.: Издательский центр «Академия», 2008. 432 с.
7. Афонин А.М. *Энергосберегающие технологии в промышленности*. М.: ФОРРУМ: ИНФРА, 2013. 272 с.
8. Бурман А.П., Розанов Ю.К., Шакарян Ю.Г. *Управление потоками электроэнергии и повышение эффективности электроэнергетических систем*. М.: Издательский дом МЭИ, 2012. 336 с.
9. Данцис Я. Б., Кацевич Л. С., Жилев Г. М. *Короткие сети и электрические параметры дуговых электропечей*. М.: *Металлургия*, 1987. 320 с.
10. Герасименко А. А., Федин В.Т. *Передача и распределение электрической энергии*. М.: КНОРУС, 2012. 648 с.
11. Серебряков А.С. *Трансформаторы*. М.: Издательский дом МЭИ, 2013. 360 с.
12. Дьяков В.И. *Типовые расчеты по электрооборудованию*. М.: Высшая школа, 1991. 169 с.

References:

1. Mortimer D. Kh. Induksionnayaplavka: tekhnologii budushchegosushchestvuyutsegodnya. *Elektrometallurgiya*. 2000;10:23–35. [Mortimer D. Kh. Induction melting: the technologies of the future exist today. *Electrical Metallurgy*. 2000;10:23–35. (in Russ.)]
2. Afonaskin A.V. Rezul'taty pervogo etapa osvoeniya dugovogo plavil'nogo agregata postoyannogo toka novogo pokoleniya na ОАО "Kurganmashzavod". *Liteinoe proizvodstvo*. 2000;11:20–23. [Afonaskin A.V. The results of the first stage of development of the direct current arc melting unit of a new generation at JSC "Kurganmashzavod". *Foundry. Technology and equipment*. 2000;11:20–23. (in Russ.)]
3. Malinovskii V. S., Dubinskaya F. E. Tekhniko-ekonomicheskie i ekologicheskie aspekty al'ternativnykh tekhnologii plavki metalla v dugovykh pechakh. *Elektrometallurgiya*. 1999;3:8–16. [Malinovskii V. S., Dubinskaya F. E. Technical and economic and environmental aspects of alternative technologies for melting metal in arc furnaces. *Electrical Metallurgy*. 1999;3:8–16. (in Russ.)]

4. Badalyan N.P., Chashchin E.A. Postroenie matematicheskoi modeli dopustimogo ustanovivshegosya rezhima elektroenergeticheskoi sistemy. Vestnik IGEU. 2012;3:43–47. [Badalyan N.P., Chashchin E.A. Construction of a mathematical model of the permissible steady-state regime of the electric power system. Vestnik IGEU. 2012;3:43–47. (in Russ.)]
5. Badalyan N.P., Kolesnik G.P., Solov'eva S.G. Izmenenie parametrov transformatora prodol'nogo vlyucheniya v skheme prodol'noi kompensatsii. Vestnik NPUA. 2017;2:33–42. [Badalyan N.P., Kolesnik G.P., Solov'eva S.G. Changing the parameters of the series switched transformer in the series compensation circuit. Vestnik NPUA. 2017;2:33–42. (in Russ.)]
6. Kudrin B.I., Mineev A.R. Elektrooborudovanie promyshlennosti. M.: Izdatel'skii tsentr "Akademiya"; 2008. 432 s. [Kudrin B.I., Mineev A.R. Electrical equipment of industry. M.: publishing centre "Akademiya"; 2008. 432 p. (in Russ.)]
7. Afonin A.M. Energosberegayushchie tekhnologii v promyshlennosti. M.: FORRUM: INFRA; 2013. 272 s. [Afonin A.M. Energy-saving technologies in industry. M.: FORRUM: INFRA; 2013. 272 p. (in Russ.)]
8. Burman A.P., Rozanov Yu.K., Shakaryan Yu.G. Upravlenie potokami elektroenergii i povyshenie effektivnosti elektroenergeticheskikh sistem. M.: Izdatel'skii dom MEI; 2012. 336 s. [Burman A.P., Rozanov Yu.K., Shakaryan Yu.G. Managing electricity flows and increasing the efficiency of electric power systems. M.: Publishing House MEI; 2012. 336 p. (in Russ.)]
9. Dantsis Ya.B., Katsevich L.S., Zhilov G.M. Korotkie seti i elektricheskie parametry dugovykh elektropечи. M.: Metallurgiya; 1987. 320 s. [Dantsis Ya.B., Katsevich L.S., Zhilov G.M. Low-voltage circuits and electrical parameters of electric arc furnaces. M.: Metallurgiya; 1987. 320 p. (in Russ.)]
10. Gerasimenko A. A., Fedin V.T. Peredacha i raspredelenie elektricheskoi energii. M.: KNORUS; 2012. 648 s. [Gerasimenko A. A., Fedin V.T. Transmission and distribution of electrical energy. M.: KNORUS; 2012. 648 p. (in Russ.)]
11. Serebryakov A.S. Transformatory. M.: Izdatel'skii dom MEI; 2013. 360 s. [Serebryakov A.S. Transformers. M.: Publishing House MEI; 2013. 360 p. (in Russ.)]
12. D'yakov V.I. Tipovye raschety po elektrooborudovaniyu. M.: Vysshaya shkola; 1991. 169 s. [D'yakov V.I. Typical calculations for electrical equipment. M.: Vysshaya shkola; 1991. 169 p. (in Russ.)]

Сведения об авторах.

Бадалян Норайр Петикович – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электротехника и электроэнергетика».

Колесник Григорий Платонович – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры «Электротехника электроэнергетика».

Соловьева София Георгиевна – магистрант кафедры «Электротехника электроэнергетика».

Чащин Евгений Анатольевич – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электротехника».

Information about the authors.

Norayr P.Badalyan – Dr. Sci. (Technical), Assoc. Prof., Department of Electrical engineering and Electric power industry

Grigory P.Kolesnik – Cand. Sci. (Technical), Prof., Department of Electrical engineering and Electric power industry.

Sofia G.Solovyova - Undergraduate Student, Department of Electrical engineering and Electric power industry

Yevgeny A.Chaschin - Cand. Sci. (Technical), Assoc. Prof., Department of Electrical engineering.

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 25.04.2018.

Принята в печать 04.06.2018.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 25.04.2018.

Accepted for publication 04.06.2018.

Для цитирования: Годжаев К.М. Влияние метода дозирования на характеристики распределительного топливного насоса дизеля. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2018; 45(2): 52-61. DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-2-52-61

For citation: Godzhaev K.M. Influence of the metering method on the characteristics of a diesel distributor fuel pump. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2018; 45(2): 52-61. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-2-52-61

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.43.038

DOI: 10.21822/2073-6185-2018-45-2-52-61

**ВЛИЯНИЕ МЕТОДА ДОЗИРОВАНИЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ
РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОГО ТОПЛИВНОГО НАСОСА ДИЗЕЛЯ**

Годжаев К.М.

*Азербайджанский технический университет,
AZ 1148, проспект Гусейн Джавида, 25, Азербайджан,
e-mail: gurban.goja8@gmail.com*

Резюме: Цель. Целью исследования является улучшение характеристики системы дозирования и управления цикловой подачей распределительного насоса дизеля. Приведены результаты исследования влияния нового метода дозирования на характеристики распределительного топливного насоса. **Метод.** Проведен математический анализ и составлена математическая модель рабочего процесса системы топливоподачи с новым методом дозирования, при котором был применен метод «распада разрыва». В составленной математической модели использована система дифференциальных уравнений сплошности и количества движения, а также уравнения массового баланса при описании граничных условий для различных полостей топливной системы над плунжером, под клапаном, над клапаном полостей и в форсунке. В дифференциальных уравнениях были учтены двухфазность газожидкостной среды в полостях нагнетания и дозирующей системе, и конструктивные особенности насоса. Приведено выражение хода дозирующего плунжера в новой системе. **Результат.** Приведены теоретические и экспериментальные характеристики системы топливоподачи с предложенной системой дозирования, диаграммы максимальных давлений впрыска в зависимости от хода дозирующего плунжера при различных ходах нагнетающего плунжера, изменения максимального давления впрыска форсунки в зависимости от оборотов кулачкового вала и диаграммы, которые характеризуют работы системы топливоподачи насоса при различных жесткостях пружины дозирующего плунжера. Приведены сравнительные параметры процесса топливоподачи при стандартном и новом методе дозирования. Описаны особенности применения распределительных насосов высокого давления дизеля, их конструктивные и рабочие особенности. Раскрыты преимущества предложенной автором системы дозирования, а также определено ее влияние на процесс топливоподачи. Приведена сравнительная оценка методов дозирования в распределительных насосах, применяемых в современных дизельных двигателях. **Вывод.** Результаты экспериментов показали приемлемость нового метода дозирования для использования в дизельных двигателях.

Ключевые слова: распределительный топливный насос, нагнетательный плунжер, дозирующий плунжер

TECHNICAL SCIENCE
POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL MECHANICAL ENGINEERING

**INFLUENCE OF THE METERING METHOD ON THE CHARACTERISTICS OF A DIESEL
DISTRIBUTOR FUEL PUMP**

Kurban M. Godzhaev

Azerbaijan Technical University,
25 Hussein Javid Ave., Baku 370073, Azerbaijan,
e-mail: kurban.goja8@gmail.com

Abstract Objectives The aim of the study is to improve the performance of the metering system and thus enhance control over the cyclical supply of fuel to a diesel distributor pump. The results of a study of the effect of a new metering method on the characteristics of a distributor fuel pump are presented. **Methods** Following mathematical analysis, a mathematical model of the working process of the fuel supply system, based on a new metering approach employing the "decay of discontinuity" method, was compiled. The model comprises a system of differential equations for continuity and momentum alongside mass balance equations for describing the boundary conditions for various cavities of the fuel system, i.e. above the plunger, under the valve, above the valve cavities and in the nozzle. The differential equations take into account the two-phase nature of the gas-liquid medium in the injection cavities and metering system, as well as the design features of the pump. An expression for the stroke of the metering plunger in the new system is given. **Results** The theoretical and experimental characteristics of a fuel supply system employing the proposed metering system are considered. Diagrams showing maximum injection pressures, which depend on the stroke of the metering plunger at various strokes of the injection plunger and alteration of maximum injection pressure of the nozzle depending on the rotation speed of the cam shaft, are provided. The characteristics of the fuel supply system of the pump for various spring stiffness of the metering plunger are also provided in diagram form. The comparative parameters of the fuel supply process are presented for the conventional and new metering methods. The features of the use of diesel high-pressure distributor pumps, their design and operational features are described. The advantages of the metering system proposed by the author are presented in terms of its influence on the fuel injection process. A comparative evaluation of metering methods used in contemporary distributor pumps for diesel engines is given. **Conclusion** The results of the experiments confirmed the suitability of the new metering method for use in diesel engines.

Keywords: distributor fuel pump, injection plunger, metering plunger

Введение. Наряду с секционными насосами широко применяются и распределительные насосы высокого давления, которые упрощают топливные системы. Совершенствование конструкций элементов традиционных дизельных топливных систем и исследование их влияния на характеристики впрыска являются одними из актуальных научных направлений в моторостроении [13, 15].

На показатели системы впрыска, а также технико-экономические и экологические показатели дизеля большое влияние оказывают характеристики топливного насоса [7]. Сложность конструкции системы дозирования и органов управления цикловой подачей топлива в распределительных топливных насосах делает актуальным их усовершенствование [10-11].

В дизельных распределительных насосах при большой интенсивности работы нагнетающего плунжера прецизионность трущихся пар ускоряется, что приводит к ухудшению характеристики насоса. Дросселирование в распределительных отверстиях и каналах уменьшает давление нагнетания. Конструкция корпуса и ограничение контактных напряжений в кулачковом механизме не даёт возможности для повышения давления впрыска.

Постановка задачи. Целью исследования является система топливоподачи с распределительным топливным насосом с новой упрощенной системой дозирования, позволяющей

улучшить характеристики системы дозирования и управления цикловой подачей распределительного насоса дизеля [1, 4-6].

Методы исследования. Преимущество предлагаемого метода дозирования и управления цикловой подачей заключается в том, что впрыск в распределительных насосах с новой конструкцией системы дозирования выполняется путем задержки открытия окна отсечки на максимальной подаче топлива и регулирование давления впрыска на различных ходах дозирующего плунжера. Схема указанной системы топливоподачи приводится на рис. 1.

Рабочий цикл насоса и описание предложенной системы дозирования.

Нагнетающий плунжер 1 (рис. 1), получая движение от кулачкового механизма (на схеме не показан), совершает возвратно-поступательное движение в гнезде втулки. За один оборот кулачкового вала, нагнетающий плунжер совершает столько ходов, сколько цилиндров он обслуживает, а кулачок имеет соответствующее количество выступов профиля. Одновременно, нагнетающий плунжер совершает вращательное движение вокруг своей оси, получая движение от кулачкового вала через специальные шестерни (на схеме не показаны). За один оборот кулачкового вала нагнетающий плунжер совершает один оборот вокруг своей оси.

При движении нагнетающего плунжера вниз, он своей боковой поверхностью открывает отверстие наполнительного канала, через которое из канала низкого давления в полость нагнетания поступает топливо и заполняет ее.

Одновременно, дозирующий плунжер 2 под действием усилия пружины и давления топлива над ним, поступающего из канала низкого давления, перемещается вниз и упирается в нижний торец цилиндрического гнезда. В дальнейшем, при движении нагнетающего плунжера вверх, вначале, до перекрытия отверстия наполнительного канала часть топлива из полости нагнетания вытесняется через наполнительный канал обратно, в канал низкого давления. При этом давление топлива в полости нагнетания ненамного превышает давление в системе низкого давления и оказывается недостаточным для преодоления усилия пружины дозирующего плунжера и поэтому, дозирующий плунжер остается в своем нижнем крайнем (по схеме) положении.

После перекрытия отверстия наполнительного канала боковой поверхностью нагнетающего плунжера давление в полости нагнетания возрастает, в результате, под действием давления в полости нагнетания дозирующий плунжер 2, преодолевая усилие пружины и силу давления в полости над ним, перемещается вверх. К этому времени в результате вращательного движения нагнетающего плунжера 1 отверстие нагнетания на его боковой поверхности совпадает с входным отверстием канала нагнетания очередного цилиндра. Но на этой стадии давление в полости нагнетания определяется усилием пружины и низким давлением над дозирующим плунжером, так как, последний своим движением вверх освобождает объем полости нагнетания и не позволяет давлению в этой полости подниматься значительно. Это давление до достижения дозирующим плунжером ограничителя 3 его хода оказывается недостаточным для открытия нагнетательного клапана 6 и начала впрыска топлива. Но дозирующий плунжер имеет возможность передвигаться только до ограничителя 3 его хода (на расстоянии h_d), высвобождая соответствующий этому объем полости, и после упора в ограничитель, его движение резко прекращается. При этом давление в полости нагнетания резко возрастает и, в результате продолжения движения нагнетающего плунжера 1, продолжает расти, вследствие высокого давления открывается нагнетательный клапан 6 и через канал нагнетания 4 происходит нагнетание топлива через трубопровод высокого давления 7 в форсунку 8. Пока отсечное отверстие плунжера находится в гнезде втулки и перекрыто, процесс впрыска продолжается. В момент, когда отсечное отверстие нагнетающего плунжера начинает выходить из гнезда и сообщается с полостью отсечки, которая, в свою очередь, соединена с каналом низкого давления, топливо из полости нагнетания через канал в нагнетающем плунжере и отсечное отверстие вытекает в полость отсечки и далее, в систему низкого давления, давление в полости нагнетания падает и, несмотря на продолжающееся движение плунжера вверх, нагнетание топлива прекращается. Таким образом, активный ход плунжера 1 начинается в момент достижения дозирующим плунжером 2 ограничителя 3 его хода и кончается в момент начала открытия отсечного отвер-

стия.

После достижения нагнетающим плунжером верхней мертвой точки, начинается его обратное движение. При этом в результате падения давления в полости нагнетания дозирующий плунжер под действием усилия пружины и давления топлива над ним перемещается вниз, до достижения крайнего нижнего положения. В дальнейшем, открывается отверстие наполнительного канала, и полость нагнетания из канала низкого давления заполняется топливом. Процесс повторяется, но в результате поворота нагнетающего плунжера, его отверстие нагнетания в следующем ходе нагнетания сообщается уже со следующим каналом нагнетания другого цилиндра двигателя.

Нами проведено расчетное исследование системы топливоподдачи с предлагаемой системой дозирования с использованием усовершенствованной проверенной на адекватность математической модели, в которой учитывается двухфазность газожидкостной среды [12, 14].

Уравнения потока математической модели решены методом «распада разрыва» [2, 8-9].

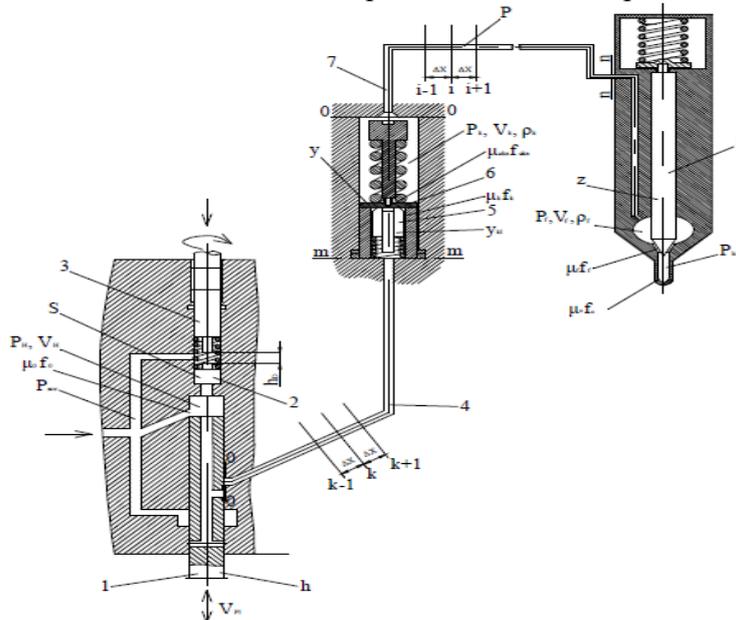


Рис.1. Расчётная схема топливоподдачи системы:

1-нагнетающий плунжер; 2-дозировующий плунжер; 3-ограничитель; 4-распределительный канал; 5-обратный клапан; 6-плоский нагнетающий клапан двухстороннего действия; 7-трубопровод высокого давления; 8-игольчатый клапан форсунки

Fig.1. The design scheme of fuel injection system:

1-injection plunger; 2-dosing plunger; 3-limiter; 4-distribution channel; 5-check valve; 6-flat double-acting injection valve; 7-high pressure pipeline; 8-needle nozzle valve

Адекватность используемой математической модели процесса топливоподдачи была подтверждена в работе [3]. В ней для описания неустановившегося потока топлива в трубопроводе высокого давления используется система дифференциальных уравнений сплошности и количества движения:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial x} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho w^2 + P)}{\partial x} = -\frac{\lambda_T}{2d_T} \rho w^2, \quad (2)$$

где: w – скорость потока, x – координата по длине трубопровода, τ – время, λ_T , d_T – соответственно, коэффициент гидравлического сопротивления и внутренний диаметр трубопровода.

Для определения давления среды было использовано выражение:

$$\frac{\partial P}{\partial \tau} = c^2 \frac{\partial \rho}{\partial \tau}, \quad (3)$$

где c – скорость распространения волны давления, которая принимается равной скорости звука в среде.

В качестве граничных условий были использованы уравнения массового баланса для различных полостей исследуемой топливной системы.

Например, для над плунжерной полости насоса уравнение массового баланса топлива имеет вид:

$$\frac{dG_H}{d\tau} = -\mu_0 f_0 \rho_{H(вс)} w_{вс} - \mu_k f_k \rho_{H(к)} w_K, \quad (4)$$

где: G_H – масса жидкой или двухфазной среды в надплунжерной полости насоса; $\mu_0 f_0$ и $\mu_k f_k$ – соответственно, эффективные проходные сечения наполнительных и отсечных окон втулки плунжера и нагнетательного клапана; $w_{вс}$ и w_K – соответственно, скорости истечения среды через наполнительные и отсечные окна втулки плунжера и нагнетательного клапана; $\rho_{вс}$, ρ_H и ρ_k – плотность среды, которая находится во всасывающей полости насоса (в системе низкого давления), над плунжером и над нагнетательным клапаном, соответственно (двойные индексы «Н(вс)» и «Н(к)» означают полости выхода среды в зависимости от направления истечения во время расчёта скоростей $w_{вс}$ и w_K , соответственно).

Аналогичные дифференциальные уравнения граничных условий были составлены и для массы сред в под клапанной, над клапанной полостях и полости форсунки. Скорости истечения среды через наполнительные и отсечные окна втулки плунжера и нагнетательного клапана определялись с использованием известных выражений Бернулли.

Дифференциальные уравнения движения нагнетательного клапана насоса и игольчатого клапана форсунки были составлены на основе второго закона Ньютона.

Ход дозирующего плунжера определялся из выражения объема нагнетания [1]:

$$V_H = V_{H_0} - f_P \cdot h_1 + f_D \cdot S_{j+1} [m^3], \quad (5)$$

где: V_{H_0} – начальное значение надплунжерного объема топлива, f_P , f_D – соответственно, поперечное сечение нагнетательного плунжера и дозирующего плунжера, h_1 – ход нагнетательного плунжера, S_{j+1} – текущее положение дозирующего плунжера.

Обсуждение результатов. В Азербайджанском техническом университете проведены расчетные и экспериментальные исследования работы системы топливоподачи с новой системой дозирования в распределительном насосе высокого давления.

На рис.2 приведен график влияния перемещения дозирующего плунжера на цикловую подачу топлива при различных значениях ограничителя дозирующего плунжера.

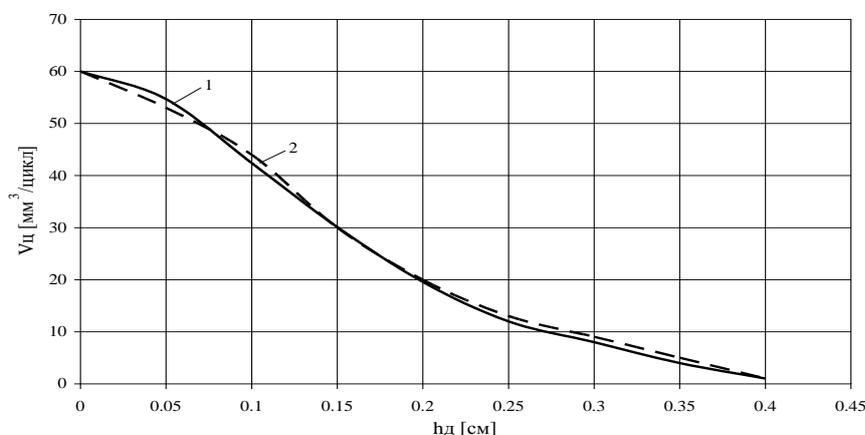


Рис.2. Характеристика подачи насоса НД-21 в зависимости от хода дозирующего плунжера ($n = 1100 \text{ мин}^{-1}$; $h_{AK} = 1.242 \text{ мм}$) [4]: 1-теоретически, 2-экспериментально

Fig.2. Characteristics of the flow pump ND-21, depending on the stroke of the metering

plunger ($n = 1100 \text{ min}^{-1}$; $h_{AK} = 1.242 \text{ mm}$) [4]: 1-theoretically, 2-experimentally

Как видно, изменения цикловой подачи топлива происходит пропорционально ходу дозирующего плунжера, который упирается в ограничитель. Во время процесса впрыска величина $V_{\text{ц}}$ зависит от объёма в нагнетательном трубопроводе. Сжимаемость топлива снижает скорость подачи, и уменьшает величину $V_{\text{ц}}$. В этом случае большая часть впрыска реализуется за счёт его расширения в нагнетательном трубопроводе.

На рис.3 приведен график изменения цикловой подачи в зависимости максимальных давлений впрыска от хода дозирующего плунжера на различных ходах нагнетающего плунжера.

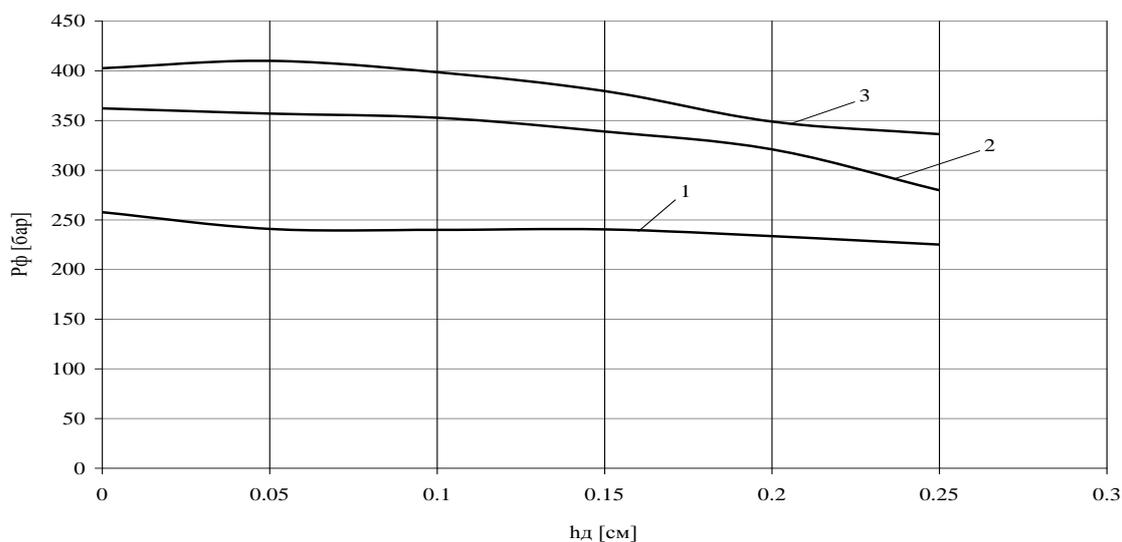


Рис.3. Диаграммы максимальных давлений впрыска в зависимости от хода дозирующего плунжера при различных ходах нагнетающего плунжера: 1 - $h_{AK} = 1.242 \text{ мм}$; 2 - $h_{AK} = 3.0 \text{ мм}$; 3 - $h_{AK} = 3.5 \text{ мм}$

Fig.3. Diagrams of maximum injection pressures depending on the stroke of the metering plunger at different strokes of the injection plunger: 1 - $h_{AK} = 1.242 \text{ mm}$; 2 - $h_{AK} = 3.0 \text{ mm}$; 3 - $h_{AK} = 3.5 \text{ mm}$

Как видно, величина $V_{\text{ц}}$ зависит от давления в нагнетательном трубопроводе. При оборотах кулачкового вала до $n = 1100 \text{ min}^{-1}$ давление топлива остается стабильным при увеличении величины $V_{\text{н}}$ от 166.7 mm^3 до 248.9 mm^3 и изменении хода дозирующего плунжера ($h_{\text{д}}$) от 0.5 мм до 1.5 мм , уменьшая при этом величину цикловой подачи $V_{\text{ц}}$ от 60 до $19.6 \text{ mm}^3/\text{цикл}$. При этом давление в над плунжерном объёме снижается с 384.15 бар до 213.32 бар в положении хода дозирующего плунжера $h_{\text{д}} = 0$ и $h_{\text{д}} = 2 \text{ мм}$ соответственно, а максимальное давление впрыска форсунки снижается с 257.62 бар до 233.5 бар в течении 2.98° и 1.28° поворота кулачкового вала, соответственно. Момент начала впрыска изменяется с 23.64° на 27.1° соответственно хода дозирующего плунжера $h_{\text{д}} = 0$ и $h_{\text{д}} = 2 \text{ мм}$.

На рис.4 приведен график изменения максимального давления впрыска форсунки в зависимости от оборотов кулачкового вала. Как видно, при сохранении характера изменения давления оно имеет более пологую форму изменения.

В интервале $250 \div 950 \text{ min}^{-1}$ оборотов кулачкового вала при ходе дозирующего плунжера до $h_{\text{д}} = 2 \text{ мм}$ с изменением скорости истечения топлива в течении $6.5 \div 10^\circ$ поворота кулачкового вала максимальное давление впрыска форсунки изменяется более гладко по сравнению с $h_{\text{д}} = 0 \text{ мм}$, т.е. со стандартным над плунжерным объёмом. Это объясняется тем, что с $h_{\text{д}} = 0 \text{ мм}$ с изменением скорости топлива в трубопроводе высокого давления в определённых оборотах кулачкового вала, повышение давления впрыска в объёмах над нагнетательным плунжером и форсунки происходит в противофазе, чем с $h_{\text{д}} = 2 \text{ мм}$.

В случае с $h_d = 2 \text{ мм}$ при колебаниях двухфазной среды перемещение массы среды в течении продолжительного времени, сопоставимого с периодом колебаний, не приводит к большому повышению давления в надплунжерном объёме и в объёме форсунки.

Это значит, что в результате колебаний с изменением скорости топлива, перепад давлений между двумя объёмами изменяется незначительно и, соответственно, повышение давления впрыска изменяется стабильно. Уменьшение давления впрыска с изменением хода дозирующего плунжера до $h_d = 2 \text{ мм}$ не влияет отрицательно на процесс на полости форсунки.

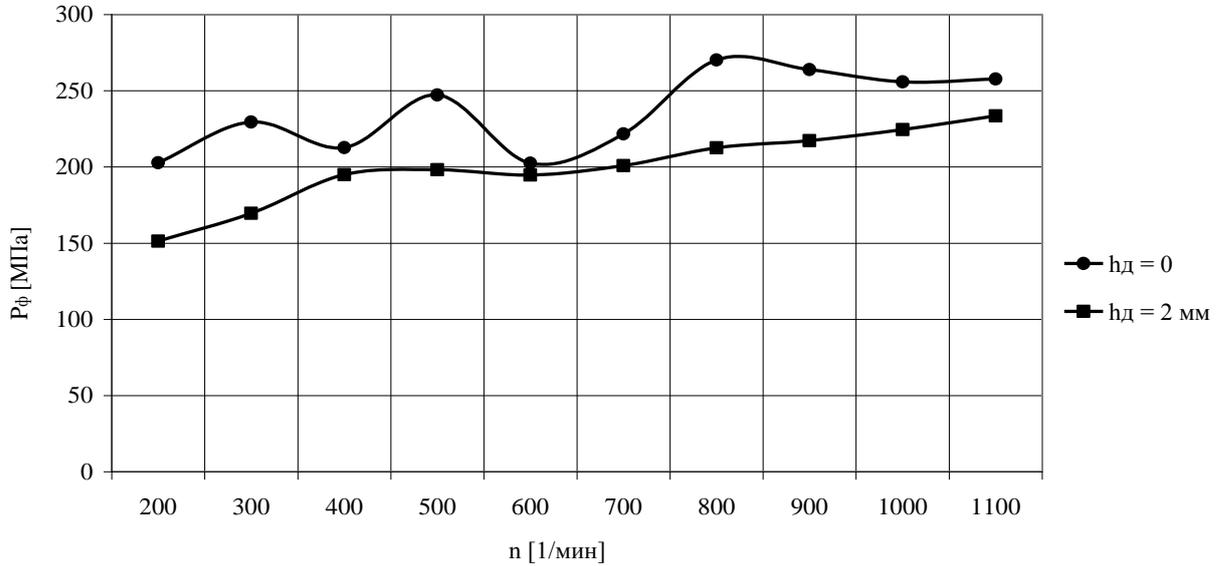
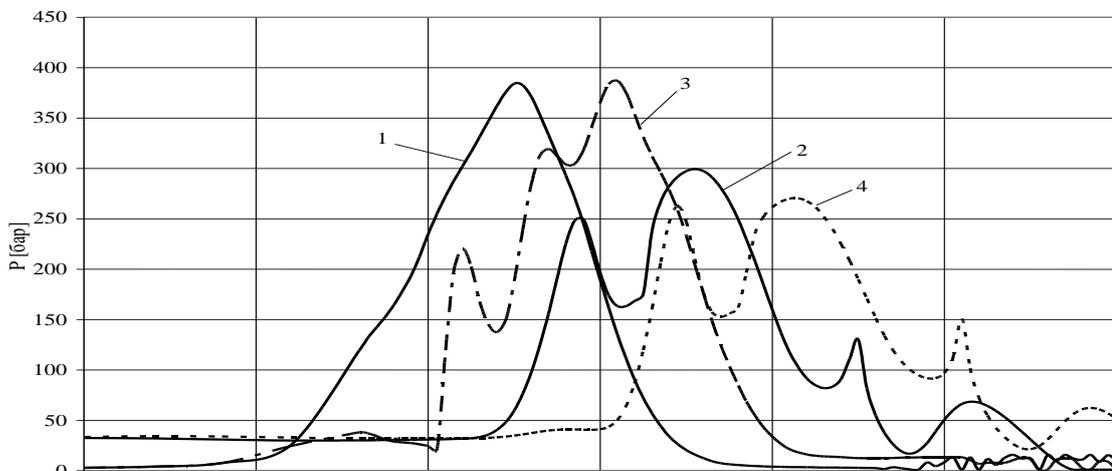
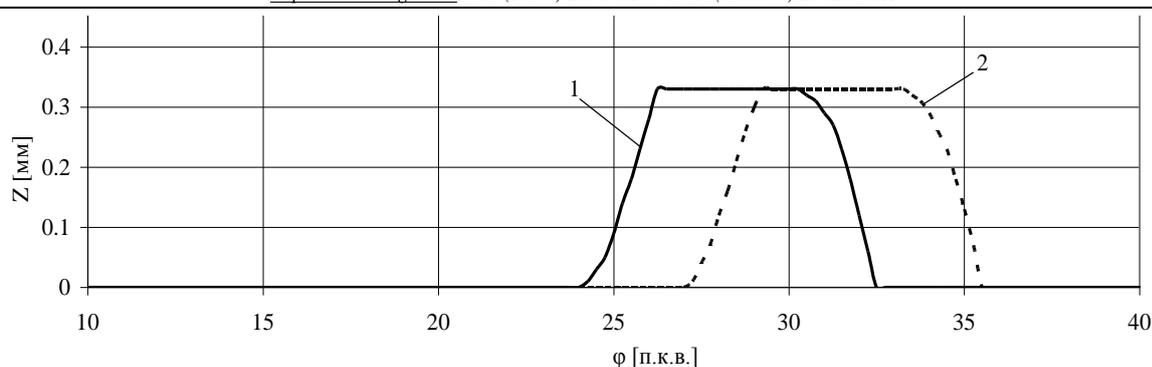


Рис.4. Диаграмма изменения максимального давления впрыска форсунки в зависимости от оборотов кулачкового вала

Fig.4. Chart of change of the maximum injection pressure of the nozzle depending on the speed of the camshaft

На математических экспериментах выявлено, что в данной конструкции на характеристику топливоподающей системы оказывает большое влияние и жесткость пружины C_d дозирующего плунжера (рис.5). С параметрами $h_{AK} = 2.028 \text{ мм}$, $h_d = 2 \text{ мм}$, $C_d = 8000 \text{ Н/м}$ с цикловой подачей $\Delta V_u = 60 \text{ мм}^3/\text{цикл}$ и одинаковыми давлениями над нагнетательным плунжером, давление впрыска форсунки, которое происходит в течении 8.25° поворота кулачкового вала, уменьшается с 299.31 бар до 270.32 бар.





б)

Рис.5. Сравнительные теоретические диаграммы, характеризующие работы системы топливоподачи насоса НД-21 ($V_{\text{ц}} = 60 \text{ мм}^3/\text{цикл}$): а-диаграммы давления в системе топливоподачи насоса: 1-давление в объёме над нагнетательным плунжером, 2-давление впрыска форсунки ($h_{\text{AK}} = 1.103 \text{ мм}$, $h_{\text{д}} = 0$, $C_{\text{д}} = 4000 \text{ Н/м}$); 3-давление в объёме над нагнетательным плунжером, 4-давление впрыска форсунки ($h_{\text{AK}} = 2.028 \text{ мм}$, $h_{\text{д}} = 2 \text{ мм}$, $C_{\text{д}} = 8000 \text{ Н/м}$); б-диаграммы подъёма игольчатого клапана форсунки:

1-при $h_{\text{AK}} = 1.103 \text{ мм}$, $h_{\text{д}} = 0$, $C_{\text{д}} = 4000 \text{ Н/м}$; 2-при $h_{\text{AK}} = 2.028 \text{ мм}$, $h_{\text{д}} = 2 \text{ мм}$, $C_{\text{д}} = 8000 \text{ Н/м}$

Fig.5. Comparative theoretical diagrams characterizing the operation of the fuel supply system of the pump ND-21 ($V_{\text{ц}} = 60 \text{ мм}^3/\text{cycle}$: а-diagrams of pressure in the fuel pumping system of the pump: 1-pressure in volume above the injection plunger, 2-injection pressure of the injector ($h_{\text{AK}} = 1.103 \text{ мм}$, $h_{\text{д}} = 0$, $C_{\text{д}} = 4000 \text{ Н/м}$);

3-pressure in the volume above the injection plunger; 4-injection pressure of the nozzle ($h_{\text{AK}} = 2.028 \text{ мм}$, $h_{\text{д}} = 2 \text{ мм}$, $C_{\text{д}} = 8000 \text{ Н/м}$); б-diagrams of lifting the needle valve of the nozzle: 1- $h_{\text{AK}} = 1.103 \text{ мм}$, $h_{\text{д}} = 0$, $C_{\text{д}} = 4000 \text{ Н/м}$; 2 $h_{\text{AK}} = 2.028 \text{ мм}$, $h_{\text{д}} = 2 \text{ мм}$, $C_{\text{д}} = 8000 \text{ Н/м}$

Момент начала впрыска, в этом случае, изменяется с 24.25° на 27.25° соответственно хода дозирующего плунжера. В это время диаграмма подъёма игольчатого клапана форсунки остается стабильной. Эти показатели значительно отличаются от показателей с параметрами $h_{\text{AK}} = 1.965 \text{ мм}$, $h_{\text{д}} = 2 \text{ мм}$, $C_{\text{д}} = 4000 \text{ Н/м}$ с цикловой подачей $\Delta V_{\text{ц}} = 60 \text{ мм}^3/\text{цикл}$ (табл.1) Это объясняется тем, что с жесткости пружины $C_{\text{д}} = 8000 \text{ Н/м}$ дозирующий плунжер движется с меньшей интенсивности во время нагнетания с измененным активным ходом нагнетательного плунжера.

С наполнением и повышением давления в трубопроводе высокого давления открытие игольчатого клапана и процесс впрыска выполняется с меньшим опозданием по сравнению с жесткостью $C_{\text{д}} = 4000 \text{ Н/м}$ и с одинаковой цикловой подачей.

Таблица 1. Показатели в зависимости от метода дозирования
Table 1. Indicators depending on the method of dosing

Метод дозирования	P_f [бар]	h_{AK} [мм]	$h_{\text{д}}$ [мм]	$C_{\text{д}}$ [Н/м]	$\varphi_{\text{фн.впр}}$ [п.к.в.]	$\varphi_{\text{фк.впр}}$ [п.к.в.]	$\varphi_{\text{ф}}$ [п.к.в.]
Стандартная	299.31	1.103	0	4000	24.25ε	32.5ε	8.25ε
С дозирующим плунжером	270.32	2.028	2	8000	27.25ε	35.5ε	8.25ε

Вывод. Расчетные исследования математической модели системы впрыска с модернизированным методом дозирования в распределительном топливном насосе показали приемле-

мость его характеристик для использования в дизельных двигателях.

В новой системе топливоподачи улучшаются условия работы топливного насоса, что может привести к увеличению долговечности в условиях эксплуатации.

Библиографический список:

1. Керимов З.Х., Годжаев К. М. Евразийский патент № 014848 «Способ управления цикловой подачей топливного насоса высокого давления и устройство для его осуществления».
2. Керимов З.Х. Некоторые результаты математического моделирования волновых процессов в двухфазной среде в дизельной топливовпрыскивающей системе // -Харьков, Двигатели внутреннего сгорания., -2004, -№1, -с.20-24.
3. Керимов З.Х. Математическое моделирование и исследование гидрогазодинамических процессов в дизельных двигателях. Диссертация на соискание ученой степени д.т.н., -Баку 2007, -432 с.
4. Годжаев К.М. Влияние нового дозирующего метода на топливовпрыскивающий процесс в дизельных распределительных насосах высокого давления. Материалы Республиканского Научно-Технического Конфранса, по теме перспективы развития транспортно-дорожного комплекса Азербайджанской Республики. -Баку 2017, -стр.42-45.
5. Годжаев К.М. Анализ рабочего процесса с новым методом дозирования в дизельных распределительных насосах высокого давления. Баку: -АзГУ, "Научные труды", -2015, -стр.60-66.
6. Годжаев К.М. Особенности внедрения нового дозирующего метода в дизельных распределительных насосах высокого давления. -Баку: -АзГУ, "Научные труды", 2015, -стр.94-100.
7. Астахов И.В. Топливные системы и экономичность дизелей -М.: Машиностроение, 1990. - 288 с.
8. Годунов С.К., Рябенский В.С. Разностные схемы. -М.: Наука, 1977. -440 с.
9. Голубков Л.Н., Перепелин А.П. Метод гидродинамического расчета топливной системы дизеля с учетом двухфазного состояния топлива // Рабочие процессы в ДВС и их агрегатах: М:Тр. МАДИ, 1987. - с. 80-87.
10. Djordjevic Ilija; 159 Kimberly Road, East Grandy, CT 06026 (US). Patent No.: 99/22134.
11. Ernst Linder, Mьhlacker; Walter Schlagmьller, Schwieberdingen, Robert Bosch GmbH, Stuttgart, Germany. Patent No.: 4,667,639.
12. Ferziger J.H., Peric M. (2002) Computational Methods for fluid Dynamics. Berlin: Springer, 423 p.
13. Heinz Heisler (1995) Advanced Engine Technology. Arnold Publications, London.
14. M.Sussman, E.Fatemi, P.Smereka, S.Osher (1997) An improved level set method for incompressible two-phase flows Center for Computational Sciences and Engineering, LLNL, Livermore, CA, 94550, USA.
15. Ralbovsky Edward (1996) Introduction to Compact and Automotive Diesels (It-Automotive Technology) 1st Edition. Delmar Publishers, New-York.
16. Hollembeak, Barry (2005). Classroom Manual for Automotive Fuels and Emissions. Cengage Learning. p. 154. Retrieved June 12, 2012.
17. Mollenhauer, K., & Tschьcke, H. (2010). Handbook of Diesel Engines. Berlin: Springer- Verlag.

References:

1. Kerimov Z.Kh., Godzhaev K. M. Evraziiskii patent № 014848 "Sposob upravleniya tsiklovoi podachei toplivnogo nasosa vysokogo davleniya i ustroistvo dlya ego osushchestvleniya" [Kerimov Z.Kh., Godzhaev K. M. Eurasian patent No. 014848 "Method for controlling the cyclic supply of a high-pressure fuel pump and the device for its implementation" (in Russ.)]
2. Kerimov Z.Kh. Nekotorye rezul'taty matematicheskogo modelirovaniya volnovykh protsessov v dvukhfaznoi srede v dizel'noi toplivovpryskivayushchei sisteme. Dvigateli vnutrennego sgoraniya. 2004;1:20-24. [Kerimov Z.Kh. Some results of mathematical modeling of wave processes in a two-phase medium in a diesel fuel-injection system. Internal combustion engines. 2004;1:20-24. (in Russ.)]
3. Kerimov Z.Kh. Matematicheskoe modelirovanie i issledovanie gidrogazodinamicheskikh protsessov v dizel'nykh dvigatelyakh. Dissertatsiya na soiskanie uchenoi stepeni d.t.n. Baku; 2007. 432 s. [Kerimov Z.Kh. Mathematical modeling and investigation of hydro-gas dynamic processes in diesel engines. Doctor of technical sciences thesis. Baku; 2007. 432 p. (in Russ.)]
4. Godzhaev K.M. Vliyanie novogo doziruyushchego metoda na toplivovpryskivayushchii protsess v dizel'nykh raspredelitel'nykh nasosakh vysokogo davleniya. Materialy Respublikanskogo Nauchno-Tekhnicheskogo Konfransa, po teme perspektivy razvitiya transportno-dorozhnogo kompleksa Azerbaidzhanskoi Respubliki. Baku; 2017. С.42-45. [Godzhaev K.M. The effect of the new metering method on the fuel-injection process in high-pressure diesel distribution pumps. Materials of the Re-

- publican scientific and technical conference on the development of the transport and road complex of the Republic of Azerbaijan. Baku; 2017. P.42-45. (in Russ.)]
5. Godzhaev K.M. Analiz rabocheho protsessa s novym metodom dozirovaniya v dizel'nykh raspreditel'nykh nasosakh vysokogo davleniya. Nauchnye trudy AzTU. Baku: AzTU; 2015. C.60-66. [Godzhaev K.M. Analysis of the working process with a new metering method in high-pressure diesel distribution pumps. Scientific works of AzTU. Baku: AzTU; 2015. P.60-66. (in Russ.)]
 6. Godzhaev K.M. Osobennosti vnedreniya novogo doziryuushchego metoda v dizel'nykh raspreditel'nykh nasosakh vysokogo davleniya. Nauchnye trudy AzTU. Baku: AzTU; 2015. C. 94-100. [Godzhaev K.M. Features of the introduction of a new metering method in high-pressure diesel distribution pumps. Scientific works of AzTU. Baku: AzTU; 2015. P. 94-100. (in Russ.)]
 7. Astakhov I.V. Toplivnye sistemy i ekonomichnost' dizelei. M.: Mashinostroenie; 1990. 288 s. [Astakhov I.V. Fuel systems and economy of diesel engines. M.: Mashinostroenie; 1990. 288 p. (in Russ.)]
 8. Godunov S.K., Ryaben'kii V.S. Raznostnye skhemy. M.: Nauka; 1977. 440 s. [Godunov S.K., Ryaben'kii V.S. Difference schemes. M.: Nauka; 1977. 440 p. (in Russ.)]
 9. Golubkov L.N., Perepelin A.P. Metod gidrodinamicheskogo rascheta toplivnoi sistemy dizelya s uchetom dvukhfaznogo sostoyaniya topliva. Rabochie protsessy v DVS i ikh agregatakh. M.:Tr. MADI; 1987. C. 80-87. [Golubkov L.N., Perepelin A.P. Method of hydrodynamic calculation of the diesel fuel system taking into account the two-phase fuel state. Work processes in ICE and their aggregates. M.:Tr. MADI; 1987. P. 80-87. (in Russ.)]
 10. Djordjevic I. Patent No.: 99/22134. CT 06026 (US).
 11. Mühlacker E.L., Schlagmüller W., Schwieberdingen R. Bosch GmbH, Stuttgart, Germany. Patent No.: 4,667,639.
 12. Ferziger J.H., Peric M. Computational Methods for fluid Dynamics. Berlin: Springer; 2002. 423 p.
 13. Heisler H. Advanced Engine Technology. London: Arnold Publications; 1995.
 14. Sussman M., Fatemi E., Smereka P., Osher S. An improved level set method for incompressible two-phase flows. Livermore, CA, USA: Center for Computational Sciences and Engineering, LLNL; 1997.
 15. Ralbovsky E. Introduction to Compact and Automotive Diesels (It-Automotive Technology). 1st Edition. New-York: Delmar Publishers; 1996.
 16. Hollembeak B. Classroom Manual for Automotive Fuels and Emissions. Cengage Learning. 2005. P.154. Retrieved June 12, 2012.
 17. Mollenhauer K., Tschüke H. Handbook of Diesel Engines. Berlin: Springer- Verlag; 2010.

Сведения об авторе.

Курбан Музаффар оглы Годжаев – старший преподаватель, кафедра автомобильная техника.

Information about the authors.

Kurban M. oglu Gojayev – Senior Lecturer, Department of Automotive Technology.

Конфликт интересов.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 12.03.2018.

Принята в печать 10.05.2018.

Conflict of interest.

The author declare no conflict of interest.

Received 12.03.2018.

Accepted for publication 10.05.2018.

Для цитирования: Гюльмагомедов К.С., Магомадов Р.А.-М., Миспахов И.Ш., Набиев Н.А., Рагимова Т.А. Устройство для остановки кровотечения с использованием соли с низкой криогидратной температурой растворения. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2018; 45 (2): 62-69. DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-2-62-69

For citation: K.S. Gylmagomedov, R.A.-M. Magomadov, I.Sh. Mispakhov, N.A. Nabiev, T.A. Ragimova. Device for cauterization of bleeding using a salt with low cryohydrate dissolution temperature. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2018; 45 (2): 62-69. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-2-62-69

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.362: 537.322

DOI: 10.21822/2073-6185-2018-45-2-62-69

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ОСТАНОВКИ КРОВОТЕЧЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОЛИ С НИЗКОЙ КРИОГИДРАТНОЙ ТЕМПЕРАТУРОЙ РАСТВОРЕНИЯ

Гюльмагомедов К.С.⁵, Магомадов Р.А.-М.², Миспахов И.Ш.³,
Набиев Н.А.⁴, Рагимова Т.А.¹

^{1,3-5} Дагестанский государственный технический университет,
^{1,3-5} 367026, г. Махачкала, пр. Имама Шамиля, 70, Россия,

² Грозненский государственный нефтяной технический университет
им. М.Д. Милиуоницикова,

² 364051 г. Грозный, проспект им. Х.А. Исаева, 100, Россия,

¹ e-mail: ragimovatamila@yandex.ru, ² e-mail: rustmag_80@mail.ru,

³ e-mail: igran.mispahov@yandex.ru, ⁴ e-mail: alternativa9372@mail.ru,

⁵ e-mail: kaziakhmed@mail.ru

Резюме. Цель. Целью исследования является рассмотрение конструкции устройства для остановки кровотечения методом локального замораживания зоны кровотока, выполненного с использованием соли с низкой криогидратной температурой растворения, а также моделирование процессов теплообмена при остановке кровотечения с использованием данного технического средства. **Метод.** Разработана конструкция устройства для остановки кровотечения, выполненного с использованием солей с низкой температурой растворения, обеспечивающая высокую интенсивность охлаждения, сокращая продолжительность образования тромба, прекращающего кровоток. Создана модель устройства, реализованная на основе решения задачи о затвердевании вязкой жидкости, а также теплообмена при растворении соли в воде. Расчет модели произведен с применением метода конечных разностей. Проведен численный эксперимент, дающий возможность судить о длительности процесса остановки кровотока. **Результат.** Получены графики зависимости изменения температуры раствора соли в воде во времени, отражающие продолжительность выхода прибора на рабочий режим; продолжительности образования твердой фазы крови толщиной 3 мм от температуры раствора для различных значений давления потока крови в зоне раны. **Вывод.** На основе проведенного численного эксперимента установлено, что в устройстве в качестве рабочего вещества (соли) может быть использован азотнокислый аммоний, при растворении которого в воде минимальная температура раствора составляет 256 К. Указано, что подбор типа соли и ее количества должен ориентироваться на медицинские нормы и стандарты во избежание процесса обморожения прилежащих к зоне кровотечения тканей. Доказано, что длительность затвердевания крови и образования тромба необходимой толщины значительно зависит от давления потока крови в зоне раны, что необходимо учитывать при проектировании прибора.

Ключевые слова: остановка кровотечения, замораживание, соль, растворение, моделирование, теплофизические процессы, расчет, численный эксперимент

TECHNICAL SCIENCE
POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL MECHANICAL ENGINEERING

*Kaziahmed S. Gulmagomedov*⁵, *Rustam A.M. Magomadov*², *Igramidin Sh. Mispahov*³, *Nabi A. Nabiye*⁴, *Tamila A. Ragimova*¹

^{1,3-5}Daghestan State Technical University,

^{1,3-5}70 I. Shamilya Ave., Makhachkala 367026, Russia,

² M.D. Milyonshchikov Grozny State Oil Technical University,

²100, H.A. Isaeva Ave., Grozny 2364051, Russia,

¹e-mail: ragimovatamila@yandex.ru, ²e-mail: rustmag_80@mail.ru,

³e-mail: igran.mispahov@yandex.ru, ⁴e-mail: alternativa9372@mail.ru,

⁵e-mail: kaziakhmed@mail.ru

DEVICE FOR CAUTERY OF BLEEDING USING A SALT WITH LOW
CRYOHYDRATE DISSOLUTION TEMPERATURE

Abstract Objectives The aim of the study is to consider the design of a device for the cauterization of bleeding by the method of local freezing of the blood flow zone performed using a salt with a low cryohydrate dissolution temperature, as well as to model heat exchange processes when using this technique. **Method** A design for a device for cauterizing bleeding using salts having a low dissolution temperature was developed. This ensures a high cooling intensity, shortening the time of formation of a thrombus stopping the blood flow. A model of the device was constructed according to the principles governing the solidification of a viscous liquid and heat transfer associated with the dissolution of salts in water. The model was calculated using the finite difference method. A determination of haemostasis duration was provided by a numerical experiment. **Results** Plots of the temperature dependence of the salt solution in water over time are obtained, reflecting the duration of the device's output to operating mode, as well as plots of duration of a 3 mm thick formation of solid phase blood against the temperature of the solution for different values of blood flow pressure in the wound area. **Conclusion** On the basis of the numerical experiment, it was established that ammonium nitrate can be used as a working substance (salt) in the device. When it is dissolved in water, the minimum temperature of the solution is 256 K. The selection of the salt type and its quantity should be guided by medical norms and regulations in order to avoid the process of frostbite of the tissues adjacent to the bleeding zone. It was shown that the duration of blood solidification and the formation of a thrombus of the required thickness depend significantly on the pressure of the blood flow in the wound area, which must be taken into account when designing the device.

Keywords: cauterization of bleeding, freeze, salt, dissolution, modelling, thermophysical processes, calculation, numerical experiment

Введение. Одним из первоочередных факторов сохранения здоровья и жизни человека при ранениях является оперативное и своевременное оказание первой медицинской помощи, которая, прежде всего, состоит в быстрой остановке кровотечения [1].

Данное обстоятельство определяется тем, что кровотечение представляет большую опасность жизни человека, так как связано с недостаточным кровоснабжением тканей и потерей крови, которое приводит к гипотензии, гипоксии, дыхательной и сосудистой недостаточности и впоследствии к смерти человека [2-4]. Поэтому оперативная остановка кровотечения дает возможность во многих случаях спасти жизнь человека, предотвращая развитие травматического шока, во многом облегчая последующее выздоровление.

В настоящее время исследования в области разработки и изучения средств остановки кровотечения проводятся в таких научных учреждениях, как Научный центр акушерств, гинекологии и перинатологии (Россия), Военно-медицинская академия им. С.М. Кирова (Россия), Российский национальный исследовательский медицинский университет им. Н.И. Пирогова, Российский научный центр хирургии им. академика Б. В. Петровского, Институт хирургиче-

ских исследований (США), Гарвардская школа медицины (США), Массачусетский технологический институт, университет Case Western Reserve (США), университет Вашингтона (США).

Прикладные исследования и разработки ведутся компаниями RevMedx Inc. (США) (прибор XStat 30) [5], iTrauma Care (США) (прибор ITClamp) [6], MedTrade Products Ltd (Великобритания) (устройство Celox™) [7], CardioCommand (США) (устройство TourniCath) [8], Z-Medica (США) (средство QuikClot) [9], производственное предприятие "Медплант" (Россия) (жгуты, зажимы) [10], Arsenal Medical (США) (жгуты, зажимы) [11], Core Scientific Creations (Израиль) (бинт WoundClot) [12], Olympus Co. (Япония) (аппарат для термокоагуляции HPU-20 Olympus) [13], ERBE Elektromedizin (Германия) (устройства для аргоноплазменной коагуляции) [14], Ellman International (США), Apexmed (Нидерланды) (кровоостанавливающие жгуты) [15], R. Poon Medical products Co. Ltd. (Китай) (кровоостанавливающие жгуты) [16].

В основном исследования проводятся в направлении создания различного рода механических приспособлений для остановки кровотечения (жгуты, зажимы, блокираторы, пакеты из спандекса, шприцы с кусочками расширяющейся целлюлозной губки, специализированные пены, пакеты с различного рода наполнителями, в частности из хитозана, гранулированный цеолит, биodeградируемая желатиновая масса), а также химических и биологических средств (медицинские препараты различных типов, искусственные тромбоциты - клетки для ускорения процесса свертывания крови и тп.). Также применяются физические методы остановки кровотечения, такие как риоэлектрокоагуляция, криоэлектрокоагуляция (парами хлорэтила), аргоноплазменная коагуляция, фотокоагуляция, термокоагуляция (использованием лазеров), монополярная коагуляция, механический гемостаз, химический гемостаз.

Все из перечисленных средств остановки кровотечения, предлагаемые изготовителями, имеют недостатки - сложность использования в полевых условиях, дискомфортность процедуры остановки кровотечения, риск повреждения близлежащих тканей, высокая стоимость, сложность оборудования, негативные постэффекты. В этих условиях перспективным является разработка и исследование нового технического средства для остановки кровотечения, реализующего метод локального замораживания места кровотока посредством использования соли с низкой криогидратной температурой, обладающего несомненными преимуществами перед существующими аналогами, устраняющего риск обморожения тканей, обладающего высокой надежностью, быстродействием, низкой стоимостью, универсальностью, экологической безопасностью.

Постановка задачи. Целью статьи является рассмотрение конструкции устройства для остановки кровотечения методом локального замораживания зоны кровотока, выполненного с использованием соли с низкой криогидратной температурой растворения, а также моделирование процессов теплообмена при остановке кровотечения с использованием данного технического средства.

Методы исследования. Структурная схема устройства приведена на рис.1 [17].

Устройство состоит из емкости 1, тонкой легко разрушающейся при механическом воздействии перегородкой 2 разделенной на две камеры, одна из которых заполнена водой 3, а вторая – солью 4 с низкой криогидратной температурой растворения (например, азотнокислый аммоний). В объеме камеры с водой 3 находятся в незафиксированном состоянии шарообразные элементы 4, снабженные по внешней поверхности шипами. На поверхность емкости 1, контактирующую с объектом воздействия – зоной кровотока, с хорошим сцеплением нанесен тонкий слой эластичного материала 5 (например, силикона).

Для осуществления плотной фиксации устройства на поврежденном участке ткани используется фиксирующее приспособление 6, выполненное виде двух полос из кожного или матерчатого материала, с одной стороны крепящихся по бокам емкости 1, а с другой имеющие возможность осуществлять соединение посредством застежки Hook & Loop («петля и крючок», лента-липучка, контактная лента, лента типа велкро).

Перед процедурой прибор тщательно дезинфицируется, затем резко встряхивается в вертикальном направлении. За счет приобретенной вследствие встряхивания кинематической энергии шарообразные элементы 4 разрушают перегородку 2, вследствие чего происходит рас-

творение соли 4 в воде 3. В результате растворения соли 4 в воде 3, сопровождающегося поглощением теплоты, образуется раствор, имеющий пониженную температуру, причем величина понижения температуры зависит от типа соли и ее количества (например, для азотнокислого аммония такая температура будет составлять $-11,5\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Далее поверхностью с нанесенным эластичным материалом 5 устройство приводится в механический контакт с поврежденным участком ткани. С помощью фиксирующего приспособления 6 производится плотное прижатие устройства к пораженному участку. При этом пораженный участок, находящийся в плотном механическом контакте с емкостью 1 также будет охлаждаться. Использование емкости с раствором соли с низкой криогидратной температурой растворения при воздействии на место кровотечения дает возможность получить более высокую интенсивность охлаждения, тем самым сокращая продолжительность образования тромба, прекращающего кровоток. При этом сокращение длительности охлаждения во многом сокращает риск обморожения близлежащих тканей.

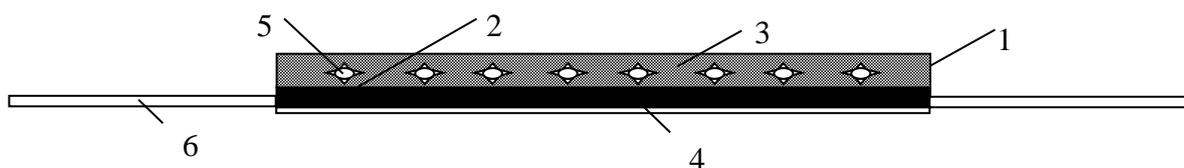


Рис.1 Конструкция устройства для остановки кровотечения
Fig.1 The design of the device to stop bleeding

Для исследования теплофизических процессов, происходящих при остановке кровотечения посредством разработанного устройства, разработана его математическая модель. Модель состоит из двух основных частей: расчета теплообмена при охлаждении раствора с солью и теплообмена при непосредственной остановке кровотечения.

В первом случае искомой величиной является температура раствора при растворении в нем некоторого количества соли, а также продолжительность выхода на стационарный режим ее значения; во втором – длительность образования ледяной корки в поврежденной зоне необходимой толщины для остановки кровотока.

Первая задача решается путем расчета требуемой температуры раствора из выражения:

$$C_p \frac{dT_p}{dt} = \frac{Q_p}{\tau}, \quad (1)$$

где C_p - теплоемкость раствора, T_p - температура раствора, τ - время, Q_p - теплота растворения соли.

Вторая - путем решения нестационарной задачи теплопроводности при фазовом переходе крови из жидкой фазы в твердую, описываемой нижеследующими соотношениями. Уравнение нестационарной теплопроводности для твердой фазы крови записывается в виде:

$$c_1 \rho_1 \frac{\partial T_1}{\partial \tau} = \lambda_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2}, \quad (2)$$

где T_1 – температура твердой фазы крови; c_1 , ρ_1 , λ_1 – теплоемкость, плотность и теплопроводность твердой фазы крови; τ – время, x – координата, начинающаяся на поверхности тела человека и направленная в его глубь.

Для температуры T_1 x ограничен условием $0 \leq x \leq \xi$, где ξ – подвижная координата границы раздела твердой и жидкой фаз крови.

Условия постоянства температуры на границе раздела фаз имеет вид

$$T_1(\xi, \tau) = T_3 = \text{const} \quad (3)$$

где T_3 - температура затвердевания крови.

Температура в жидкой фазе изменяется по закону

$$c_2 \rho_2 \frac{\partial T_2}{\partial \tau} = \lambda_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2}, \quad (4)$$

где T_2 - температура жидкой фазы крови; c_2 , ρ_2 , λ_2 - теплоемкость, плотность и теплопроводность жидкой фазы крови.

Температура жидкой фазы T_2 на глубине H ($H \gg \xi$) не изменяется в течение рассматриваемого процесса, оставаясь примерно равной температуре человеческого тела T_T :

$$T_2(x, \tau) \Big|_{x \geq H} = T_T = \text{const}. \quad (5)$$

Уравнение теплового баланса на границе раздела фаз имеет вид:

$$\lambda_1 \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=\xi} = \alpha(T_T - T_s) + (v + P_{кр}) \frac{d\xi}{d\tau}, \quad (6)$$

где $P_{кр}$ - давление потока крови в зоне раны, α - коэффициент теплообмена на границе твердой и жидкой фазы крови, v - теплота замерзания единицы объема жидкой фазы крови.

Уравнение теплового баланса между устройством и зоной кровотока описывается уравнением:

$$T_1(x, \tau) \Big|_{x=0} = T_p. \quad (7)$$

Решение уравнений (1)-(7) методом конечных разностей с начальными условиями, определяющими равенство температуры устройства температуре окружающей среды, а крови - температуры тела человека, даст возможность определить продолжительность процесса остановки кровотока в зависимости от различных параметров, характеризующих как сам прибор, так и процесс кровотока.

Обсуждение результатов. По модели, описываемой выражениями (1)-(7), произведен численный эксперимент, результаты которого представлены на рис.2-3. На рис.2 рассмотрено изменение температуры раствора соли в воде во времени.

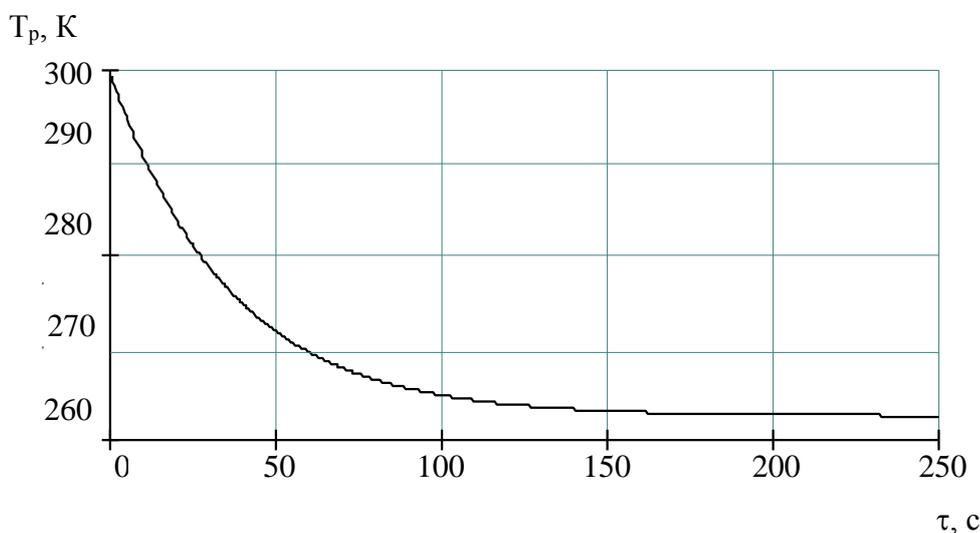


Рис.2. Изменение температуры раствора соли в воде во времени
Fig.2. The change in temperature of the salt solution in water over time

Расчеты произведены при следующих исходных данных: $T_T = 309,6$ К, $T_s = 273,56$ К, $\alpha = 100$ Вт·м⁻²·К⁻¹, $v = 320 \cdot 10^3$ Дж·м⁻³, $P_{кр} = 16 \cdot 10^3$ Дж·м⁻³, $\rho_1 = 0,8$ кг·м⁻³, $c_1 = 3690$ Дж·кг⁻¹·К⁻¹, $\lambda_1 = 0,478$ Вт·м⁻¹·К⁻¹, $\rho_2 = 1,05$ кг·м⁻³, $c_2 = 3880$ Дж·кг⁻¹·К⁻¹, $\lambda_2 = 0,478$ Вт·м⁻¹·К⁻¹, в качестве соли предполагалось использование азотнокислого аммония ($C_p = 3890$ Дж·кг⁻¹·К⁻¹, $Q_p = 222,82 \cdot 10^3$ Дж·кг⁻¹ при массовой доле соли в воде 47,5 % [18]).

Согласно полученным данным при растворении в воде соли азотнокислого аммония с массовой долей 47,5 % температура раствора снижается до 263 К (стационарный режим) примерно через 130 с. Данное обстоятельство позволяет сделать вывод о возможности достаточно оперативного выхода устройства на рабочий режим и, соответственно, оперативного оказания помощи пострадавшему. Здесь необходимо отметить, что температура раствора будет напря-

мую зависеть от количества растворенной в воде соли.

Для азотнокислого аммония такое предельное снижение температуры будет иметь место при растворении 190 г соли в 100 мл воды и составит приблизительно 256 К [19].

На рис.3 представлены графики, отражающие зависимость продолжительности образования твердой фазы крови толщиной 3 мм от температуры раствора для различных значений $P_{кр}$.

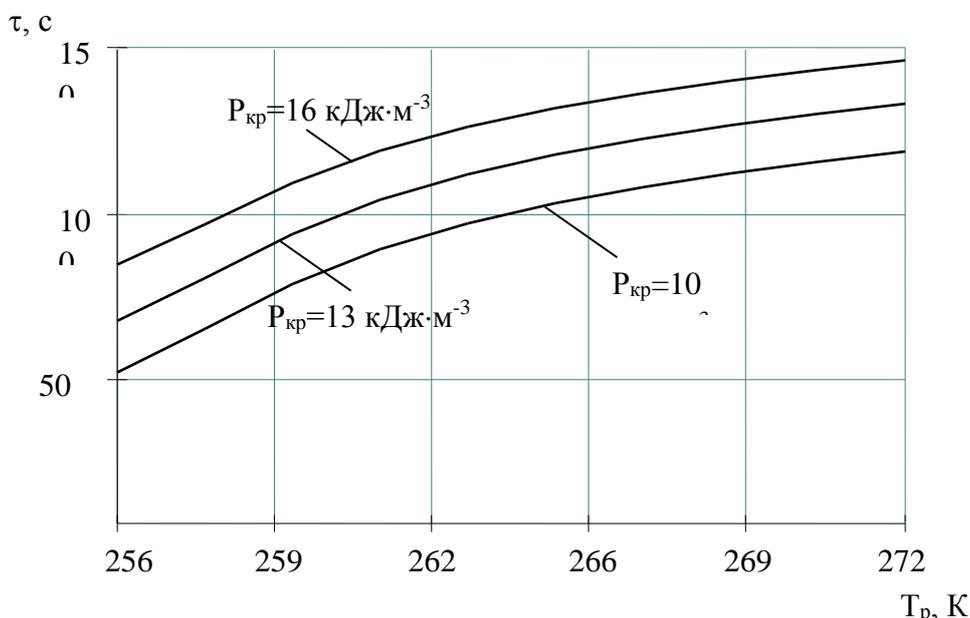


Рис.3. Изменение длительности образования твердой фазы крови толщиной 3 мм от температуры раствора

Fig.3. The change in the duration of the formation of a solid phase of blood 3 mm thick from the temperature of the solution

Согласно полученным данным с уменьшением температуры раствора продолжительность образования твердой фазы требуемой толщины и, соответственно, продолжительность остановки кровотока уменьшается. Так, уменьшение T_p с 272 до 256 К при $P_{кр}=16$ кДж·м⁻³ снижает время образования твердой фазы крови толщиной 3 мм с 145 до 85 с.

Данное обстоятельство вполне очевидно, так как уменьшение температуры раствора соли приводит к увеличению интенсивности теплообмена между устройством и объектом воздействия. Однако здесь следует отметить некоторые ограничения по используемым типам соли и степени их растворения в воде, определяющие температуру раствора, относительно продолжительности замораживания зоны кровотока.

Так, по существующим требованиям [20] продолжительность охлаждения человеческого организма до величины примерно 263 К не должна превышать 20 мин., при меньших температурах данный предел уменьшается еще больше. Поэтому подбор типа соли и ее количества должен соответствовать определенным ограничениям: одновременно позволять сократить продолжительность образования тромба, прекращающего кровотока и не допускать обморожения тканей.

По результатам расчетов установлено, что данному обстоятельству может соответствовать соль азотнокислого аммония, при растворении которой в воде температура раствора максимально снижается до 256 К.

Как следует из приведенных на рис.3 зависимостей, длительность затвердевания крови и образования тромба необходимой толщины сильно зависит от давления потока крови в зоне раны. Согласно расчетным данным изменение $P_{кр}$ с 10 до 16 кДж·м⁻³ увеличивает продолжительность образования тромба примерно на 40 с. В случае высоких значений $P_{кр}$ в данном случае при существующей возможности целесообразным является использование локального замораживания места кровотока совместно с механическими, химическими или биологическими способами остановки кровотока.

Вывод.

1. Предложена конструкция устройства для остановки кровотечения, выполненного с использованием солей с низкой температурой растворения, дающее возможность обеспечивать высокую интенсивность охлаждения, сокращая продолжительность образования тромба, прерывающего кровоток.

2. Разработана модель устройства для остановки кровотечения, реализованная на основе решения задачи о затвердевании вязкой жидкости, а также теплообмена при растворении соли в воде.

3. В результате численного эксперимента получена зависимость продолжительности образования твердой фазы крови толщиной 3 мм от температуры раствора при различном давлении потока крови в зоне раны.

4. Установлено, что в устройстве в качестве рабочего вещества (соли) может быть использован азотнокислый аммоний, при растворении которого в воде минимальная температура раствора составляет 256 К.

5. Указано, что подбор типа соли и ее количества должен ориентироваться на медицинские нормы и стандарты во избежание процесса обморожения прилежащих к зоне кровотечения тканей.

Библиографический список:

1. Корнеев А. Первая медицинская помощь. Донецк: БАО. - 2013. - 240 с.
2. Глыбочко П.В., Николаенко В.Н. и др. Первая медицинская помощь. Москва: Академия. - 2013. - 305 с.
3. Яромич И.В. Скорая и неотложная медицинская помощь. Минск: Высшейшая школа. - 2010. - 289 с.
4. Miroslav Savic, Borut Fonda, NejcSarabon, Actual temperature during and thermal response after whole-body cryotherapy in cryo-cabin // Journal of thermal biology. - 2013. - №38. -P.186-191.
5. <https://www.revmedx.com> (дата доступа 14.05.2018).
6. <https://www.primarytraumacare.org>(дата доступа 14.05.2018).
7. <http://www.medtrade.co.uk>(дата доступа 14.05.2018).
8. <http://www.cardiocommand.com>(дата доступа 14.05.2018).
9. <https://www.z-medica.com/Z-Medica>(дата доступа 14.05.2018).
10. <http://medplant.ru>(дата доступа 14.05.2018).
11. <https://arsenalmedical.com>(дата доступа 14.05.2018).
12. <http://www.woundclot.com>(дата доступа 14.05.2018).
13. <http://www.olympus.co.ru/med/endo/instr/instr-gastr-06.html>(дата доступа 14.05.2018).
14. <https://ru.erbe-med.com/ru-ru>(дата доступа 14.05.2018).
15. <http://www.ellman.com>(дата доступа 14.05.2018).
16. http://www.r-roonmedical.com/index_en.aspx(дата доступа 14.05.2018).
17. Патент РФ № 2603323 Устройство для остановки кровотечения / Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Евдулов Д.В., Казумов Р.Ш., опубл. 27.11.2016, Бюл. №33.
18. Perry D.L. Handbook of inorganic compounds. - CRC Press. - 2011. - P. 29.
19. Коленко Е.А. Термоэлектрические охлаждающие приборыЛ.: Наука (Ленинградское отделение). - 1967. - 282 с.
20. Ушаков А.А. Практическая физиотерапия. М.: ООО «Медицинское информационное агентство». - 2009. - 608 с.

References:

1. Korneev A. Pervaya meditsinskaya pomoshch'. Donetsk: BAO; 2013. 240 s. [Korneev A. First Aid. Donetsk: BAO; 2013. 240 p. (in Russ.)]
2. Glybochko P.V., Nikolaenko V.N. idr. Pervaya meditsinskaya pomoshch': Uchebnik. Moscow: Alademiya; 2013. 305 s. [Glybochko P.V., Nikolaenko V.N. et al. First Aid: Tutorial. Moscow: Alademiya; 2013. 305 p. (in Russ.)]
3. Yaromich I.V. Skoraya i neotlozhnaya meditsinskaya pomoshch'. Minsk: Vysheishaya shkola; 2010. 289 s. [Yaromich I.V. First Aid and emergency medical care. Minsk: Vysheishaya shkola; 2010. 289 p. (in Russ.)]

4. Savic M., Fonda B., Sarabon N. Actual temperature during and thermal response after whole-body cryotherapy in cryo-cabin. Journal of thermal biology. 2013;38:186-191.
5. <https://www.revmedx.com> (access date 14.05.2018).
6. <https://www.primarytraumacare.org> (access date 14.05.2018).
7. <http://www.medtrade.co.uk> (access date 14.05.2018).
8. <http://www.cardiocommand.com> (access date 14.05.2018).
9. <https://www.z-medica.com/Z-Medica> (access date 14.05.2018).
10. <http://medplant.ru> (access date 14.05.2018).
11. <https://arsenalmedical.com> (access date 14.05.2018).
12. <http://www.woundclot.com> (access date 14.05.2018).
13. <http://www.olympus.co.ru/med/endo/instr/instr-gastr-06.html> (access date 14.05.2018).
14. <https://ru.erbe-med.com/ru-ru> (access date 14.05.2018).
15. <http://www.ellman.com> (access date 14.05.2018).
16. http://www.r-poonmedical.com/index_en.aspx (access date 14.05.2018).
17. Ismailov T.A., Evdulov O.V., Evdulov D.V., Kazumov R. Sh. Ustroistvo dlya ostanovki krvotecheniya. Patent RU № 2603323. Byul. №33. Opubl. 27.11.2016. [Ismailov T.A., Evdulov O.V., Evdulov D.V., Kazumov R. Sh. Device for stopping bleeding. Patent RU № 2603323. Bull. №33. Publ. 27.11.2016. (In Russ.)].
18. Perry D.L. Handbook of inorganic compounds. CRC Press. 2011. P. 29.
19. Kolenko E.A. Termoelektricheskie okhlazhdayushchie pribory L.: Nauka (Leningradskoe otделение). 1967. 282 s. [Kolenko E.A. Thermoelectric cooling devices. L.: Nauka (Leningrad branch). 1967. 282 p. (in Russ.)]
20. Ushakov A.A. Prakticheskaya fizioterapiya. M.: OOO "Meditsinskoe informatsionnoe agentstvo" 2009. 608 s. [Ushakov A.A. Practical physiotherapy. M.: OOO "Meditsinskoe informatsionnoe agentstvo" 2009. 608 p. (in Russ.)]

Сведения об авторах:

Гюльмагомедов Казиахмед Самудинович – аспирант, кафедра теоретической и общей электротехники.

Набиев Наби Абдулаевич – аспирант, кафедра теоретической и общей электротехники.

Магоматов Рустам Абу-Муслимович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электротехника и электропривод».

Миспахов Играмидин Шарафидинович – старший преподаватель, кафедра теоретической и общей электротехники.

Рагимова Тамила Арслановна – кандидат технических наук, доцент, кафедра теоретической и общей электротехники.

Information about the authors:

Kaziahmed S. Gulmagomedov – Postgraduate Student, Department of Theoretical and General Electrical Engineering.

Nabi A. Nabiyev – Postgraduate Student, Department of Theoretical and General Electrical Engineering.

Rustam A.-M. Magomadov – Cand.Sci. (Technical), Assoc.Professor, Head of the Department «Electrical Engineering and Electric Drive».

Igramidin Sh. Mispahov – Senior Assistant, Department of Theoretical and General Electrical Engineering.

Tamila A. Ragimova – Cand.Sci. (Technical), Assoc.Professor, Department of Theoretical and General Electrical Engineering.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 12.03.2018.

Принята в печать 22.05.2018.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 12.03.2018.

Accepted for publication 22. 05.2018.

Для цитирования: Лобанов И.Е. Математическое низкорейнольдсовое моделирование теплообмена при турбулентном течении в плоских каналах с симметрично расположенными на обеих сторонах турбулизаторами. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2018; 45 (2): 70-93. DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-2-70-93

For citation: Lobanov I.E. Mathematical low-reynolds modeling of heat exchange in turbulent flow in flat channels with turbulators symmetrically located on both sides. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2018; 45(2): 70-93. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-2-70-93

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ УДК 532.517.4 : 536.24

DOI: 10.21822/2073-6185-2018-45-2-70-93

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ НИЗКОРЕЙНОЛЬДСОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ТУРБУЛЕНТНОМ ТЕЧЕНИИ В ПЛОСКИХ КАНАЛАХ С СИММЕТРИЧНО РАСПОЛОЖЕННЫМИ НА ОБЕИХ СТОРОНАХ ТУРБУЛИЗАТОРАМИ

Лобанов И.Е.

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4, Россия
e-mail: lloobbaannooff@live.ru

Резюме. Цель. Целью исследования является моделирование теплообмена в плоских каналах с симметрично расположенными на обеих его сторонах турбулизаторами в зависимости от геометрических параметров канала и режимов течения теплоносителя с верификацией существующим экспериментом полученных расчётных данных. **Метод.** Расчёт проводился на базе теоретического метода, основанного на решении факторизованным конечно-объёмным методом уравнений Рейнольдса, замыкаемых с помощью модели переноса сдвиговых напряжений Менгера, и уравнения энергии на разномасштабных пересекающихся структурированных сетках (ФКОМ). **Результат.** Сгенерирована теоретическая математическая модель расчёта для интенсифицированного теплообмена при турбулентном течении для плоского канала с симметрично расположенными на обеих его сторонах турбулизаторами в зависимости от геометрических параметров канала и режимов течения теплоносителя. Получены результаты расчёта интенсифицированного теплообмена в плоских каналах с двойными турбулизаторами в зависимости от определяющих параметров, хорошо согласующиеся с существующим экспериментальным материалом и имеющие перед последними неоспоримое преимущество, поскольку допущения, принятые при их выводе, охватывают гораздо более широкий диапазон определяющих параметров, чем ограничения, имеющиеся в экспериментах ($Pr=0,74100$; $Re=10^3 \div 10^6$; $h/d_3=0,005 \div 0,2$; $t/h=1 \div 200$). **Вывод.** На основе разработанной модели можно осуществлять оптимизацию интенсификации теплообмена в плоских каналах с двойными турбулизаторами, а также управлять процессом интенсификации теплообмена. Проведены сравнительные расчёты и анализ интенсифицированных гидросопротивления и теплообмена для плоских каналов с двусторонними симметричными турбулизаторами потока с соответствующими данными для круглых каналов с турбулизаторами. С точки зрения интенсификации теплообмена при прочих равных условиях имеет место редукция плоского канала с двусторонними симметричными турбулизаторами по отношению к круглой трубе с турбулизаторами, т.к. меньшее увеличение теплообмена достигается при большем увеличении гидравлического сопротивления. Расчётным путём установлено, что относительное гидравлическое сопротивление $\xi_{\text{П}}/\xi_{\text{Т}}$ для каналов с турбулизаторами всегда выше, чем для гладких каналов, однако, относительный теплообмен $Nu_{\text{П}}/Nu_{\text{Т}}$ может для каналов с турбулизаторами быть выше, чем для гладких каналов, поэтому имеет место более оптимальное перераспределение температурного напора по сечению канала при интенсифицированном теплообмене. Разработанный теоретический метод, основанный на решении факторизованным конечно-объёмным методом уравнений Рейнольдса, замыкаемых с помощью модели переноса сдвиговых напряжений Менгера, и уравнения энергии на разномасштабных пересекающихся структурированных сетках, позволяет с приемлемой точностью проводить расчеты коэффициентов теплоотдачи и гидравлического сопротивления в плоских каналах с практически любыми формами двойных симметрично расположенных турбулизаторов потока.

Ключевые слова: математическая модель, плоский канал, турбулизатор, моделирование, теплообмен, турбулентный, течение, интенсификация, двусторонний, симметричный, низкорейнольдсовый, сетка

TECHNICAL SCIENCE
POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL MECHANICAL ENGINEERING

**MATHEMATICAL LOW-REYNOLDS MODELING OF HEAT EXCHANGE
IN TURBULENT FLOW IN FLAT CHANNELS WITH TURBULATORS
SYMMETRICALLY LOCATED ON BOTH SIDES**

Igor E. Lobanov

Moscow Aviation Institute (National Research University)

4 Volokolamskoe shosse, Moscow 125993, Russia,

e-mail: lloobbaannooff@live.ru

Abstract Objectives The aim of the study was to simulate the heat transfer in flat channel with turbulators, symmetrically located on its both sides, depending on the channel's geometric parameters and the coolant flow modes followed by the verification of the obtained calculated data by the existing experiment. **Methods** The calculation was carried out on the basis of a theoretical method based on the solution of the Reynolds equations, closed with the help of the Menter shear stress transport model, by factored finite-volume method, as well as the energy equation on multiscale intersecting structured grids (Fast COmposite Mesh method, FCOM). **Results** A theoretical mathematical calculation model for intensified heat exchange in turbulent flow for a flat channel with turbulators, symmetrically located on both sides, depending on the channel's geometric parameters and coolant flow modes was generated. The calculation results of the intensified heat exchange in flat channels with double turbulators, depending on the determining parameters, are in very good agreement with the existing experimental material and have an undeniable advantage over the latter, since the assumptions made in their derivation cover a much wider range of determining parameters than the limitations of the experiments ($Pr = 0.7$ ч 100 ; $Re = 10^3$ ч 10^6 ; $h / d_{\text{э}} = 0.005$ ч 0.2 ; $t / h = 1$ ч 200). **Conclusion** According to the calculation results based on the developed model, it is possible to optimise the heat exchange intensification in flat channels with double turbulators, as well as to control the process of heat exchange intensification. The comparative calculations of the intensified hydraulic resistance and heat exchange for flat channels with two-sided symmetrical flow turbulators with corresponding data for round channels with turbulators were carried out and analysed. From the point of view of heat exchange intensification, all other conditions being equal, the reduction of a flat channel with two-sided symmetrical turbulators with respect to a round tube with turbulators takes place because a smaller increase in heat exchange is achieved with a greater increase in hydraulic resistance. It was established by calculation that the relative hydraulic resistance $\zeta_{\text{П}} / \zeta_{\text{T}}$ for channels with turbulators is always higher than for smooth channels; however, the relative heat exchange $Nu_{\text{П}} / Nu_{\text{T}}$ for channels with turbulators can be higher than for smooth channels. Therefore, there is an enhanced redistribution of the temperature drop over the channel section with an intensified heat exchanger. The developed theoretical method based on the solution of the Reynolds equations by the factored finite-volume method, combined with the energy equation on multiscale intersecting structured grids and closed by means of the Menter shear stress transport model, makes it possible, with reasonable accuracy, to calculate heat exchange coefficients and hydraulic resistance in flat channels of practically any forms of double symmetrically located flow turbulators.

Keywords: mathematical model, flat channel, turbulator, modelling, heat exchange, turbulent, flow, intensification, two-sided, symmetric, low-Reynolds, mesh

Введение. Широкое применение в современных теплообменных аппаратах и устройствах получили теплообменные устройства с каналами, имеющими некруглое поперечное сечение, в частности, плоские каналы, в которых теплообмен осуществляется не через всю омываемую поверхность. Тепловое нагружение плоского канала может быть несимметричным, поскольку тепловые потоки на различных поверхностях могут быть неодинаковыми, а именно: плоские каналы с односторонним обогревом или с двусторонним обогревом с неравными тепловыми потоками. Для достижения компактности теплообменных аппаратов и теплообменных

устройств применяется интенсификация теплообмена, которая в плоских каналах достигается, в основном, двумя путями: турбулизацией потока и развитием поверхности теплообмена. Может применяться комбинация вышеупомянутых методов интенсификации.

Первый способ интенсификации теплообмена, связанный с развитием поверхности теплообмена, в большинстве случаев приводит к значительному увеличению стоимости каналов по сравнению с гладкими каналами, в то же время он может быть неэффективен для определённых режимных и физических параметров процесса теплообмена, на которых нелишне остановиться подробнее. Эти устройства для интенсификации теплообмена имеют значительные по сравнению с несущим каналом размеры, что делает невозможным их применение в узких плоских каналах; их целесообразно применять при малых плотностях теплового потока, когда термическое сопротивление оребрения несущественно — с ростом тепловых потоков эффективность оребрения резко падает, поэтому больших плотностях тепловых потоков применение оребрения нецелесообразно, поскольку эффективность оребрения резко снижается при использовании материалов с низкой теплопроводностью; промышленное изготовление оребренных каналов гораздо сложнее, чем гладких, поэтому они обладают более высокой стоимостью по сравнению с последними.

Интенсификация теплообмена в плоских каналах посредством установки поверхностных турбулизаторов как на одной, так и на обеих поверхностях (одинарные и двойные выступы соответственно) лишена соответствующих недостатков, присущих развитию поверхности теплообмена [1-2]. Она не требует существенного увеличения внешних размеров плоских каналов и поэтому применима в любых плоских каналах. Изготовление турбулизаторов на поверхностях плоских каналов не связано со значительными технологическими трудностями. Схема интенсификации теплообмена для плоского канала посредством установки турбулизаторов на обеих сторонах показана на рис. 1.



Рис. 1. Сетка плоского канала, состоящая из нескольких секций с расположенным посередине турбулизатором, входного и выходного гладкого участков (в периодической постановке рассматривается только одна секция)

Fig. 1. The Grid of the Flat channel, Consisting of several sections with a turbulator located in the middle, an Input and output smooth sections (only one section is considered in the periodic setting)

В отличие от случая, рассмотренного с теоретических позиций в [12-20], когда турбулизаторы устанавливались только на одной (нижней – «внутренней») поверхности плоского канала, в рамках данного исследования рассматривается случай, когда турбулизаторы расположены на обеих поверхностях плоского канала, причём турбулизаторы должны не иметь смещения друг относительно друга и быть равной высоты. Аналитические исследования интенсифицированного теплообмена для плоских каналов с двусторонними симметрично расположенными турбулизаторами потока были проведены в работах [21-22].

Постановка задачи. На данном этапе развития ставится задача детерминирования локальных значений интенсифицированного теплообмена и гидравлического сопротивления в плоских каналах с двусторонними симметрично расположенными турбулизаторами потока на основе теоретического метода, основанного на решении факторизованным конечно-объёмным методом уравнений Рейнольдса, замыкаемых с помощью модели переноса сдвиговых напряжений Ментера, и уравнения энергии на разномасштабных пересекающихся структурированных сетках (ФКОМ). Правомочность применения вышеуказанного метода основано на том, что ранее он позволил с приемлемой точностью проводить расчеты коэффициентов теплоотдачи и гидравлического сопротивления в трубах с практически любыми формами кольцевых турбулизаторов, в том числе полученных накаткой, для прямых круглых труб с турбулизаторами [23-34].

В последние годы интенсивно развиваются многоблочные вычислительные технологии для решения задач вихревой аэромеханики и теплофизики, базирующиеся на пересекающихся структурированных сетках.

Основной целью данного исследования является теоретическое исследование осреднённых и локальных параметров интенсифицированного течения и теплообмена, а также вихревых зон для плоских каналов с двусторонними симметричными турбулизаторами прямоугольного поперечного сечения с помощью факторизованного конечно-объёмного метода (ФКОМ), который был успешно апробирован при расчете подобных течений в [23-36].

Данная работа непосредственно посвящена исследованию структуры потока в трубе, интенсифицированного поверхностными периодически расположенными турбулизаторами прямоугольного поперечного сечения.

Методы исследования. Оптимальным методом интенсификации теплообмена на обеих сторонах плоского канала является применение периодических поверхностно расположенных турбулизаторов потока на них, который позволит существенно интенсифицировать теплоотдачу при достаточно умеренном росте гидравлического сопротивления.

Эмпирические данные по интенсифицированному теплообмену при турбулентном течении в плоских каналах с периодически поверхностно расположенными турбулизаторами потока на обеих сторонах.

Для данного исследования представляют интерес только те плоские каналы с турбулизаторами на обеих поверхностях, в которых интенсификация теплообмена обеспечивалась, в основном, за счёт искусственной турбулизации потока вблизи стенки, а не за счёт увеличения площади поверхности теплообмена. Достаточно подробные эмпирические данные были приведены в [1-2], где было показано, что установка турбулизаторов на второй поверхности плоского канала незначительно увеличивает теплоотдачу на первой поверхности плоского канала, но существенно увеличивает гидравлическое сопротивление.

Последнее обстоятельство указывает на то, что установка двойных турбулизаторов потока в плоских каналах целесообразна только тогда, когда необходимо увеличить теплообмен на обеих его поверхностях.

Экспериментальные данные для двустороннего подогревания воздуха в относительно коротких плоских каналах с поперечными двусторонними (а также односторонними) прямоугольными турбулизаторами потока [3-4] позволили сгенерировать эмпирическую зависимость для интенсифицированного теплообмена в диапазонах $t/h=10$ ч20; $h/d_{\text{э}}=0,047$ ч0,078; $\alpha=(30$ ч90) $^{\circ}$; $B/H=1$ ч4; $Re=(1$ ч6) $\cdot 10^4$:

$$\begin{aligned} Nu = \frac{1}{8} \xi Re Pr \left\{ P \cdot (B/H)^{0,1} (h/d_{\text{э}})^{0,35} Re^{0,35} \left(\frac{\xi + (B/H)(\xi - \xi_{\text{ГЛ}})}{8} \right)^{0,175} \times \right. \\ \times \left(\frac{\alpha}{90^{\circ}} \right)^m \left(\frac{t/h}{10} \right)^n - \left(\frac{t/h}{10} \right)^{0,35} (B/H)_{B/H < 2}^p \left[12,31 - 27,07 \left(\frac{\alpha}{90^{\circ}} \right) + 17,86 \left(\frac{\alpha}{90^{\circ}} \right)^2 \right] \left. \right\} \times \\ \times \left(\frac{\xi + (B/H)(\xi - \xi_{\text{ГЛ}})}{8} \right)^{-0,8} + 1 \Bigg)^{-1}, \end{aligned} \quad (1)$$

где B – ширина плоского канала, H – высота плоского канала; h – высота турбулизатора; t – шаг между турбулизаторами; α – угол размещения турбулизаторов к оси плоского канала; $d_{\text{э}}$ – эквивалентный диаметр плоского канала $\left(d_{\text{э}} = \frac{2BH}{B+H} = 2H \frac{(B/H)}{1+(B/H)} \right)$, P – коэффициент, равный 2,24 для плоского канала с турбулизаторами на обеих поверхностях и 1,88, когда турбулизаторы установлены только на одной поверхности; ξ , $\xi_{\text{ГЛ}}$ – коэффициенты гидравлического сопротивления плоского канала с турбулизаторами и гладкого плоского канала соответственно;

$p=0$ при $\alpha=90^\circ$, $p=0,35$ при $\alpha<90^\circ$ (если $B/H>2$, то следует принимать $B/H>2$); $m=0,35$ и $n=0,1$ при $B/H=1$; $m=0$ и $n=0$ при $B/H=2$ [1, 3, 4].

Экспериментально установленное увеличение теплоотдачи в плоских каналах с турбулизаторами составляет 2ч2,8 при увеличении гидравлического сопротивления в 3,35ч6 раз [1-4].

Существуют довольно многочисленные экспериментальные данные по теплообмену в плоских каналах с турбулизаторами, относящиеся не только к длинным каналам, но и к коротким. Например, в исследованиях [5-6] приведены результаты экспериментального исследования интенсифицированного теплообмена в плоском канале с полукруглыми выступами на обеих поверхностях канала.

Здесь имеет место одновременное развитие гидродинамического и температурного пограничных слоёв, и, согласно [5-6], максимальная теплоотдача имеет место на расстоянии $(3,35ч6) \cdot h$ от турбулизатора и с повышением скорости перемещается по потоку, а средний теплообмен не зависит от расстояния от входа в канал, определяется геометрическими параметрами турбулизаторов h/t и h/H , и описывается следующим эмпирическим выражением для $h/t=0,25ч0,78$; $h/H=0,00905ч0,04$; $Re=(3ч40) \cdot 10^4$:

$$\overline{Nu} = Re^{0,8} \left\{ \left[1,04 \left(\frac{h}{t} \right) - 10,4 \left(\frac{h}{t} \right)^2 \right] \cdot \left[1,03 - 0,14 \left(\frac{h}{H} \right) - 1,04 \left(\frac{h}{H} \right)^2 \right] + 0,03 \right\}, \quad (2)$$

где определяющим размером для чисел Нуссельта и Рейнольдса является расстояние от входа в канал x , коэффициент теплоотдачи отнесён к полной поверхности канала с турбулизаторами.

Эмпирическое выражение для гидравлического сопротивления для плоских каналов с турбулизаторами на обеих поверхностях выглядит следующим образом [5, 6]:

$$\xi = 2 \frac{\left\{ 1,22 \left(\frac{h}{t} \right)^{-0,4} \left[0,37 + 5,22 \left(\frac{h}{H} \right) - 6,72 \left(\frac{h}{H} \right)^2 \right] + 0,125 \left(\frac{l}{H} \right)^{0,9} \right\}}{\left(\frac{l}{d_\circ} \right) Re^{[0,21-1,89 \left(\frac{h}{t} \right)^{1,13}]}}}, \quad (3)$$

где l — длина канала.

Расчёт теплообмена и гидравлического сопротивления в коротких плоских каналах с гладкими стенками в полной мере рассмотрен в монографии [7]. Из вышеприведённых данных и из анализа, приведённого в [1-2], следует, что экспериментальные данные по интенсифицированному теплообмену в плоских каналах с турбулизаторами на обеих поверхностях довольно немногочисленны, выполнены в достаточно узких диапазонах чисел Рейнольдса и Прандтля, геометрических характеристик турбулизаторов, поэтому необходимость генерации теоретических методов исследования данного вида теплообмена является актуальной и имеет существенные перспективы.

Представленный анализ указывает на преимущество интенсификации круглых труб с турбулизаторами по отношению к плоскому каналу с двойными турбулизаторами при прочих равных условиях (ранее такой же вывод был сделан относительно кольцевого канала с турбулизаторами на внутренней трубе и плоского канала с турбулизаторами на одной из сторон). В дальнейшем, в целях доказательства адекватности разработанной в данном исследовании теории, её необходимо сравнить с имеющимися экспериментальными данными.

Теоретическое исследование локальных и осреднённых параметров течения и теплообмена в плоских каналах с турбулизаторами представляется наиболее перспективным в направлении разработки на основе многоблочных вычислительных технологий специализированных распараллеленных пакетов, целевые направления которых можно охарактеризовать следующим образом.

1. Развитие оригинальных многоблочных вычислительных технологий [23-25, 35], основанных на разномасштабных пересекающихся структурированных сетках, для высокоэффективного и точного решения нестационарных двумерных и трёхмерных задач конвективного теплообмена в прямых круглых трубах и плоских каналах с организованной шероховатостью в виде выступов в однородной рабочей среде в достаточно широком диапазоне чисел Рейнольдса ($Re=10^4 \div 10^6$) и Прандтля ($Pr=0,7 \div 12$). Отличие от предыдущих вариантов пакета [23-25, 35] состоит в том, что методология дополняется использованием периодических граничных условий, позволяющим оценивать асимптотические характеристики труб и плоских каналов с дискретной шероховатостью. Модификация позволит увеличить вычислительную эффективность моделирования, реализовать коррекцию на кривизну линий тока. Для труб и плоских каналов с турбулизаторами детерминируются: поверхностные распределения локальных и интегральных силовых и тепловых характеристик (давления, трения, тепловых потоков, сопротивления движению, гидравлических потерь), профилей составляющих скорости, давления, температуры и характеристик турбулентности (энергии турбулентности, турбулентной вязкости, составляющих тензора рейнольдсовых напряжений, генерации, диссипации и т.п.).

2. Исходная система дифференциальных уравнений в частных производных — уравнений Навье-Стокса и Рейнольдса, замыкается с помощью модифицированной с учетом кривизны линий тока, согласно подходу Менгера, модели переноса сдвиговых напряжений. Исходные сведения об управляющих уравнениях и приемлемых граничных условиях содержатся в [37]. Используются основанные на периодических граничных условиях оригинальные процедуры коррекции давления и среднemasсовой температуры.

Методология решения исходных уравнений — основанная на концепции расщепления по физическим процессам процедура коррекции давления. Для задач с периодическими граничными условиями применяются процедуры коррекции градиента давления и среднemasсовой температуры. Методическая основа перспективного расчётного инструмента — многоблочные вычислительные технологии, базирующиеся на использовании структурированных, пересекающихся разномасштабных сеток, связанных с улавливанием характерных структурных элементов вихревого течения и температурного поля, что обеспечит приемлемую точность и высокую эффективность, сравнимую с использованием адаптивных сеток.

Специфические особенности, характерные для периодических граничных условий, заключаются, в основном, в следующем. Периодические граничные условия обуславливают более оптимальное построение сетки трубы. Плоский канал разбивается на нескольких секций с расположенным в середине турбулизатором и входного и выходного гладких участков (рис. 2).

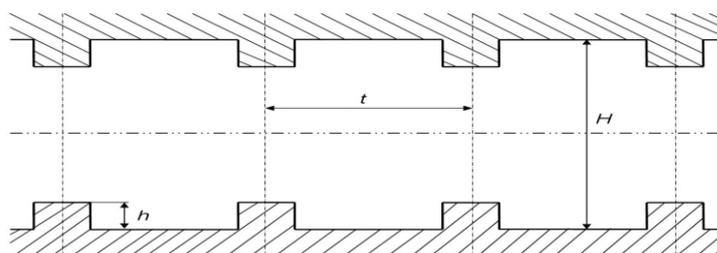


Рис. 2. Плоский канал с симметрично расположенными турбулизаторами одинаковых высот и шагов на обеих поверхностях (двойные турбулизаторы)

Fig. 2. Flat channel with symmetrically located turbulizers of identical heights and steps on both surfaces (double turbulizers)

В периодической постановке рассматривается только одна секция, в то время как в общем случае необходимо использовать несколько секций (в работах [23-25, 35-36] число секций доходило до 12; отдельные исследования включали 20 секций).

Для уменьшения числа расчётных узлов в трубе выделяется более подробная пристеночная область (синяя сетка) и менее подробная осевая (зелёная). При это степень детализации меняется, как в продольном, так и в окружном направлениях (при применения трёхмерного

случая). Кроме того, для трёхмерного расчёта в приосевой области вводится т.н. «заплата», устраняющая ненужные ступени сетки вблизи оси. Последнее обстоятельство, при прочих равных условиях, уменьшает необходимое число расчётных ячеек примерно в полтора раза (данное обстоятельство становится ещё важнее при трёхмерных расчётах). Можно ещё сократить число ячеек, если применить периодические условия по продольной оси, т.к. входной и выходной участки элиминируются и оставляется одна секция.

В плане гидродинамики периодическая задача ставится, как задача с сохранением заданного массового расхода, вычисленного для единичной скорости на входе. В плане теплообмена, в зависимости от выбранных граничных условий для температуры, возможны два варианта. Для изотермических стенок задача решается в предположении постоянства среднемассовой температуры во входном сечении. Во втором – считается известным градиент среднемассовой температуры, вычисляемый по значению теплового потока на стенках. Естественно, что входная температура при этом не фиксируется. Кроме периодической полной записью текущего состояния задачи в программе предусмотрена возможность выполнения с заданным интервалом выборочных записей с их накоплением в файле, что особенно важно для использования при решении нестационарных задач.

3. Главное внимание уделяется локальным и интегральным характеристикам конвективного теплообмена в плоском канале с двусторонними симметрично расположенными турбулизаторами, в том числе составляющим скорости, гидравлическим потерям и средней по выделенной площади участка стенки канала теплоотдаче, результатам расчёта по турбулентным характеристикам членов уравнения для энергии турбулентных пульсаций (генерации, диссипации, конвективного и диффузионного переноса). Для внешнего обтекания прямоугольных выступов сходный подход был применён, напр., в [38].

Обсуждение результатов. Можно констатировать, что структура турбулентного потока в плоском канале, в котором требуется интенсифицировать теплоотдачу, удовлетворительно изучена экспериментальным и теоретическим образом, что обуславливает необходимость максимального увеличения интенсивности турбулентных пульсаций в определенных областях потока, в которых это даст наибольший интенсификационный эффект.

В целях успешного использования отрывных зон в плоских каналах с турбулизаторами, необходимо знать механизм их взаимодействия с основным турбулентным потоком и механизм процессов в самой отрывной зоне. Качественно, на основе экспериментальных данных для круглых труб с турбулизаторами, они изучены в той мере, что можно целенаправленно использовать вихревые зоны в целях интенсификации теплообмена в трубах [1, 2].

В работе рассматриваются наиболее характерные случаи применения периодических симметричных поверхностно расположенных турбулизаторов прямоугольного поперечного сечения в плоских каналах (объект исследования) [1, 2], а именно: $Pr=0,72\div 10$; $Re=10^3\div 10^5$; $h/D_{\text{э}}=0,056\div 0,102$; $t/D=0,28\div 2,04$ (h – высота турбулизатора; $D_{\text{э}}$ – эквивалентный диаметр плоского канала с турбулизаторами; t – шаг между турбулизаторами; Pr и Re – числа Прандтля и Рейнольдса соответственно); данный диапазон является более широким, чем диапазон экспериментальных исследований [1-4].

В рамках данной статьи рассматриваются, в основном, турбулизаторы квадратного поперечного сечения (поперечное сечение рассматриваемого плоского канала с симметричными поперечными поверхностно расположенными турбулизаторами потока квадратного поперечного сечения показано на рис. 1.), поскольку они наиболее применимы для интенсификации теплообмена. Для турбулизаторов другой ширины турбулизаторов закономерности будут сходными, кроме крайних случаев: слишком узкие турбулизаторы будут больше турбулизировать ядро потока, чем пристенный слой, а для слишком широких турбулизаторов будут присутствовать закономерности, характерные для труб с канавками («траншеями») [35]. Для остальных случаев интенсификации теплообмена структура вихревых зон и интегральные характеристика течения и теплообмена будут иметь качественно сходный характер.

Для данного случая был использован двумерный (плоскосимметричный) подход к задаче с периодическими граничными условиями [33-34, 37].

Обоснованность реализации двумерного подхода для решения поставленных в данном

исследовании задач была предварительно обоснована решением сходных задач для круглой трубы с турбулизаторами в трёхмерной постановке и сравнении результатов расчётов с двумерным (осесимметричным) подходом. Сравнительный анализ двух- и трёхмерных решений для труб с турбулизаторами показал, что они близки друг к другу, однако, расчёт трёхмерной задачи увеличивает расчётное время на два порядка.

Например, для $h/D=0,056$; $t/D=0,56$; $Re=10^4$; $Pr=0,72$ рассчитанные по трёхмерной модели коэффициент гидравлического сопротивления $\xi=0,18476$ и число Нуссельта $Nu=88,06$; аналогичные значения, рассчитанные по двумерной модели, равны $\xi=0,18524$ и число Нуссельта $Nu=87,00$. Следовательно, различия между двух- и трёхмерным подходами для расчёта осреднённых параметров течения и теплообмена для каналов симметричной геометрии с турбулизаторами составляют порядка одного процента.

Для характерных случаев для рассматриваемого диапазона геометрических и режимных параметров ($h/D_3=0,056\div 0,102$; $t/D_3=0,28\div 2,04$; $Re=5\cdot 10^3\div 2\cdot 10^4$ $Pr=0,72$), которые были исследованы экспериментально [1-4], линии тока для плоских каналов с двусторонними симметричными турбулизаторами приведены на рис. 3–7.

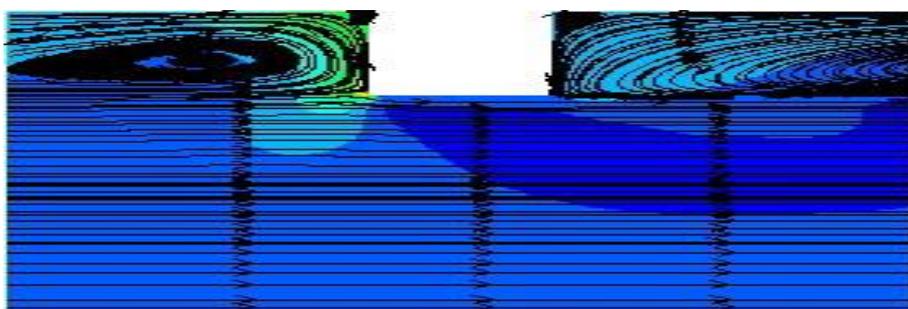


Рис. 3. Линии тока для плоских каналов с турбулизаторами при $h/D_3=0,056$; $t/D_3=0,28$
Fig. 3. Current lines for flat channels with turbulizers at $h/DE=0,056$; $t/DE=0,28$

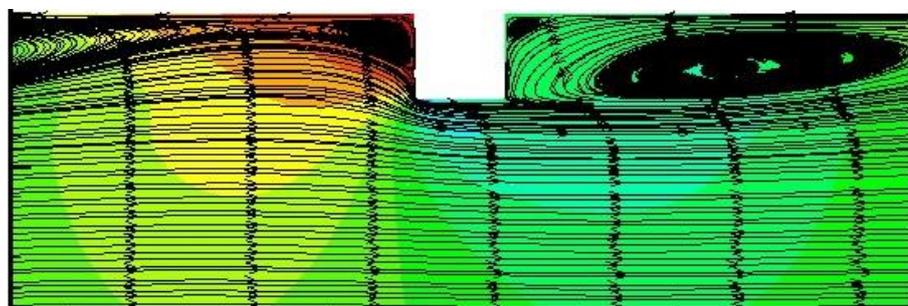


Рис. 4. Линии тока для плоских каналов с турбулизаторами при $h/D_3=0,056$; $t/D_3=0,56$; $Re=10^4$; $Pr=0,72$

Fig. 4. Current lines for flat channels with turbulizers at $h / DE = 0.056$; $t / DE = 0.56$; $Re = 104$; $Pr = 0,72$

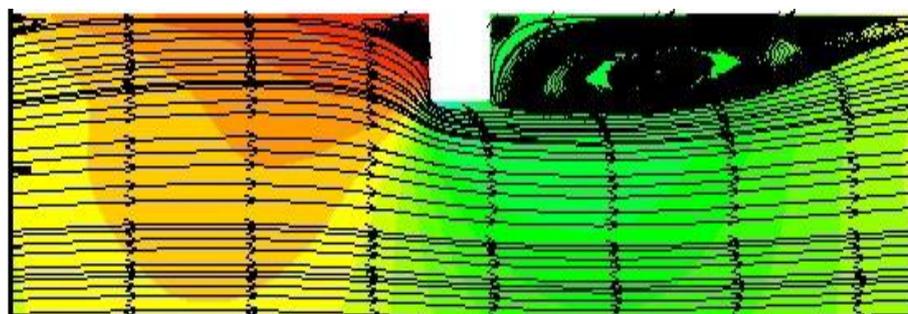


Рис. 5. Линии тока для плоских каналов с турбулизаторами при $h/D_3=0,056$; $t/D_3=0,84$; $Re=10^4$; $Pr=0,72$

Fig. 5. Current lines for flat channels with turbulizers at $h / DE = 0.056$; $t / DE = 0.84$; $Re = 104$; $Pr = 0.72$

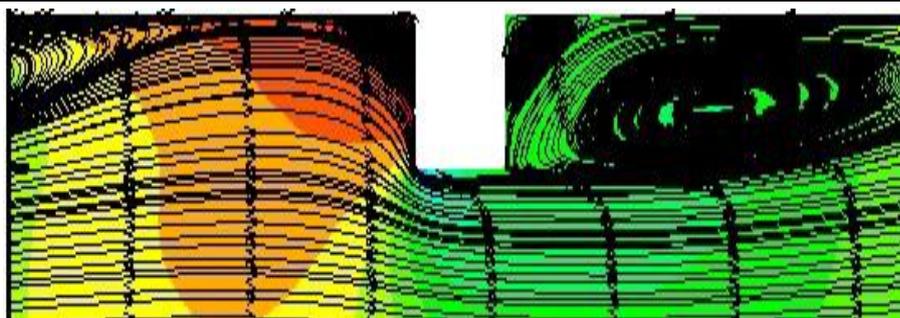


Рис. 6. Линии тока для плоских каналов с турбулизаторами при $h/D_3=0,102$; $t/D_3=1,02$; $Re=10^4$; $Pr=0,72$

Fig. 6. Current lines for flat channels with turbulizers at $h / DE = 0.102$; $t / DE = 1.02$; $Re = 104$; $Pr = 0.72$



Рис. 7. Линии тока для плоских каналов с турбулизаторами при $h/D_3=0,102$; $t/D_3=2,04$; $Re=10^4$; $Pr=0,72$

Fig. 7. Current lines for flat channels with turbulizers at $h / DE = 0.102$; $t / DE = 2.04$; $Re = 104$; $Pr = 0.72$

Аспекту исследования линий тока в трубах с турбулизаторами уделено подробное внимание в работах [23-35]. В плоских каналах с двусторонними симметричными турбулизаторами линии тока имеют сходный характер (рис. 3-7). Соответствующий (аналогичный [23-35]) анализ позволяет выяснить характер изменения локальных и осреднённых параметров течения и теплообмена в зависимости от геометрических и режимных характеристик в плоских каналах с двусторонними симметричными турбулизаторами. Кратко можно отметить, что на рис. 3-7 отчетливо видны системы вихрей, характерные для закрытых, открытых и полукрытых впадин, аналогичные системам вихрей для круглых труб с турбулизаторами [31-36].

Реализация вышеизложенного метода позволила получить расчётные значения локальных значений гидравлического сопротивления и теплообмена в плоских каналах с двойными симметричными турбулизаторами квадратного поперечного сечения в зависимости от геометрических характеристик турбулизаторов и режимов течения теплоносителя.

Сопоставление расчётных данных по интенсифицированному теплообмену при турбулентном течении в плоских каналах с двойными турбулизаторами с существующими экспериментальными данными.

Расчётные значения для теплообмена для воздуха в плоском канале с периодическими поверхностно расположенными симметричными двойными турбулизаторами потока необходимо сравнить с соответствующими экспериментальными данными различных авторов, которые наиболее полно представлены в [1-10].

Наиболее надёжные экспериментальные данные по теплообмену и гидравлическому сопротивлению в плоских каналах с двусторонними симметрично расположенными турбулизаторами представлены в работах [3-4].

Расчётные данные по разработанной в данной работе теории в диапазоне исследования работ [3-4] представлены в табл. 1.

Таблица 1. Расчётные данные по гидравлическому сопротивлению и теплообмену для плоских каналов с двусторонними симметричными турбулизаторами, полученные теоретическим методом, основанном на решении факторизованном конечно-объёмным методом уравнений Рейнольдса, замыкаемых с помощью модели переноса сдвиговых напряжений Ментера, и уравнения энергии на разномасштабных пересекающихся структурированных сетках

Table 1. Design data on hydraulic resistance and heat transfer for flat channels with two-sided symmetric turbulators, obtained by a theoretical method based on solving the Reynolds equations factorized by the finite-volume method, closed using the Menter shear stress transfer model, and the energy equation on multi-scale intersecting structures tured grids

Re	Pr	h/D_3	t/D_3	ξ	Nu
2·10 ³	0,72	0,056	0,28	0,05512	9,138
3·10 ³	0,72	0,056	0,28	0,05562	13,342
4·10 ³	0,72	0,056	0,28	0,05706	18,162
5·10 ³	0,72	0,056	0,28	0,08312	34,52
6·10 ³	0,72	0,056	0,28	0,08348	41,42
7·10 ³	0,72	0,056	0,28	0,08408	47,64
8·10 ³	0,72	0,056	0,28	0,08506	53,34
9·10 ³	0,72	0,056	0,28	0,08484	58,9
10 ⁴	0,72	0,056	0,28	0,08414	64,02
1,1·10 ⁴	0,72	0,056	0,28	0,08258	68,74
1,2·10 ⁴	0,72	0,056	0,28	0,0814	73,12
1,3·10 ⁴	0,72	0,056	0,28	0,08034	77,44
1,4·10 ⁴	0,72	0,056	0,28	0,07962	81,5
1,5·10 ⁴	0,72	0,056	0,28	0,07876	85,4
1,6·10 ⁴	0,72	0,056	0,28	0,07796	88,18
1,7·10 ⁴	0,72	0,056	0,28	0,07692	93,42
1,8·10 ⁴	0,72	0,056	0,28	0,07636	96,72
1,9·10 ⁴	0,72	0,056	0,28	0,07582	100,4
2·10 ⁴	0,72	0,056	0,28	0,07524	104,52
2·10 ³	0,72	0,056	0,56	0,18622	17,24
3·10 ³	0,72	0,056	0,56	0,1969	25,28
4·10 ³	0,72	0,056	0,56	0,2096	33,46
5·10 ³	0,72	0,056	0,56	0,2028	39,18
6·10 ³	0,72	0,056	0,56	0,2232	48,48
7·10 ³	0,72	0,056	0,56	0,2114	52,9
8·10 ³	0,72	0,056	0,56	0,214	59,22
9·10 ³	0,72	0,056	0,56	0,2346	69,16
10 ⁴	0,72	0,056	0,56	0,219	71,78
1,1·10 ⁴	0,72	0,056	0,56	0,221	77,92
1,2·10 ⁴	0,72	0,056	0,56	0,2222	83,84
1,3·10 ⁴	0,72	0,056	0,56	0,2234	89,64
1,4·10 ⁴	0,72	0,056	0,56	0,225	95,82
1,5·10 ⁴	0,72	0,056	0,56	0,226	101,18
1,6·10 ⁴	0,72	0,056	0,56	0,227	106,84
1,7·10 ⁴	0,72	0,056	0,56	0,2282	112,58
1,8·10 ⁴	0,72	0,056	0,56	0,2284	118,22
1,9·10 ⁴	0,72	0,056	0,56	0,2294	123,44
2·10 ⁴	0,72	0,056	0,56	0,2298	128,76
2·10 ³	0,72	0,056	0,84	0,2644	17,564
3·10 ³	0,72	0,056	0,84	0,2794	25,58
4·10 ³	0,72	0,056	0,84	0,293	33,5
5·10 ³	0,72	0,056	0,84	0,3014	40,92
6·10 ³	0,72	0,056	0,84	0,309	48,14
7·10 ³	0,72	0,056	0,84	0,3134	54,92
8·10 ³	0,72	0,056	0,84	0,3304	63,28
9·10 ³	0,72	0,056	0,84	0,3214	68,14
10 ⁴	0,72	0,056	0,84	0,325	74,56

продолжение таблицы 1.
 continuation of Table 1.

1,1·10 ⁴	0,72	0,056	0,84	0,3278	80,78
1,2·10 ⁴	0,72	0,056	0,84	0,3312	87,04
1,3·10 ⁴	0,72	0,056	0,84	0,3334	93,04
1,4·10 ⁴	0,72	0,056	0,84	0,3356	98,96
1,5·10 ⁴	0,72	0,056	0,84	0,3378	104,84
1,6·10 ⁴	0,72	0,056	0,84	0,3406	110,8
1,7·10 ⁴	0,72	0,056	0,84	0,3428	116,56
1,8·10 ⁴	0,72	0,056	0,84	0,3446	122,22
1,9·10 ⁴	0,72	0,056	0,84	0,3466	127,92
2·10 ⁴	0,72	0,056	0,84	0,3486	133,48
2·10 ³	0,72	0,102	1,02	0,7358	23,82
3·10 ³	0,72	0,102	1,02	0,794	34,08
4·10 ³	0,72	0,102	1,02	0,813	43,3
5·10 ³	0,72	0,102	1,02	0,818	51,94
6·10 ³	0,72	0,102	1,02	0,8334	60,2
7·10 ³	0,72	0,102	1,02	0,8304	68,64
8·10 ³	0,72	0,102	1,02	0,8426	75,9
9·10 ³	0,72	0,102	1,02	0,8452	83,46
10 ⁴	0,72	0,102	1,02	0,8466	90,8
1,1·10 ⁴	0,72	0,102	1,02	0,8464	97,94
1,2·10 ⁴	0,72	0,102	1,02	0,8444	104,88
1,3·10 ⁴	0,72	0,102	1,02	0,8478	112
1,4·10 ⁴	0,72	0,102	1,02	0,8456	118,68
1,5·10 ⁴	0,72	0,102	1,02	0,847	125,52
1,6·10 ⁴	0,72	0,102	1,02	0,848	132,32
1,7·10 ⁴	0,72	0,102	1,02	0,8452	138,68
1,8·10 ⁴	0,72	0,102	1,02	0,8388	145,12
1,9·10 ⁴	0,72	0,102	1,02	0,8442	151,58
2·10 ⁴	0,72	0,102	1,02	0,8466	158,24
2·10 ³	0,72	0,102	2,04	1,2226	24,56
3·10 ³	0,72	0,102	2,04	1,2654	34,52
4·10 ³	0,72	0,102	2,04	1,3102	43,76
5·10 ³	0,72	0,102	2,04	1,3556	52,7
6·10 ³	0,72	0,102	2,04	1,399	61,28
7·10 ³	0,72	0,102	2,04	1,433	69,72
8·10 ³	0,72	0,102	2,04	1,4616	77,84
9·10 ³	0,72	0,102	2,04	1,4786	85,74
10 ⁴	0,72	0,102	2,04	1,5008	93,72
1,1·10 ⁴	0,72	0,102	2,04	1,516	101,46
1,2·10 ⁴	0,72	0,102	2,04	1,5296	109,06
1,3·10 ⁴	0,72	0,102	2,04	1,5434	116,6
1,4·10 ⁴	0,72	0,102	2,04	1,556	123,94
1,5·10 ⁴	0,72	0,102	2,04	1,5618	131,18
1,6·10 ⁴	0,72	0,102	2,04	1,5666	138,14
1,7·10 ⁴	0,72	0,102	2,04	1,572	145,08
1,8·10 ⁴	0,72	0,102	2,04	1,5804	152,18
1,9·10 ⁴	0,72	0,102	2,04	1,586	159,02
2·10 ⁴	0,72	0,102	2,04	1,5894	165,7

В дальнейшем, вышеприведённые теоретические данные сравниваются с экспериментом [3-4] на рис. 8-13.

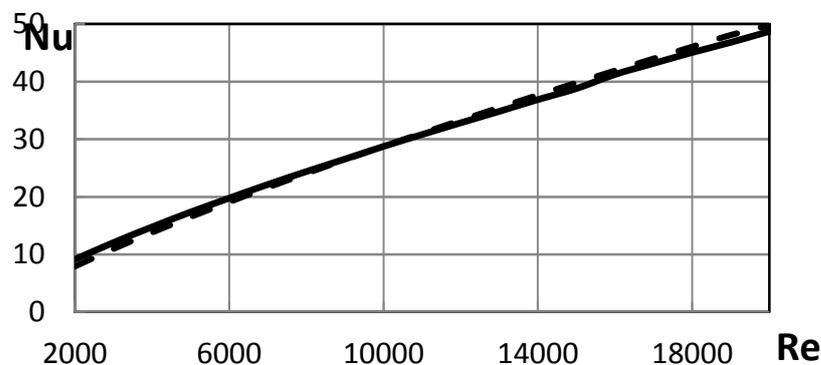


Рис. 8. Сравнение расчётных данных (сплошная линия) по теплообмену для плоских каналов без турбулизаторов с соответствующими экспериментальными данными (пунктирная линия) [3-4] для экспериментального диапазона определяющих параметров

Fig. 8. Comparison of calculated data (solid line) for heat transfer for flat channels without turbulators with the corresponding experimental data (dashed line) [3-4] for the experimental range of defining parameters

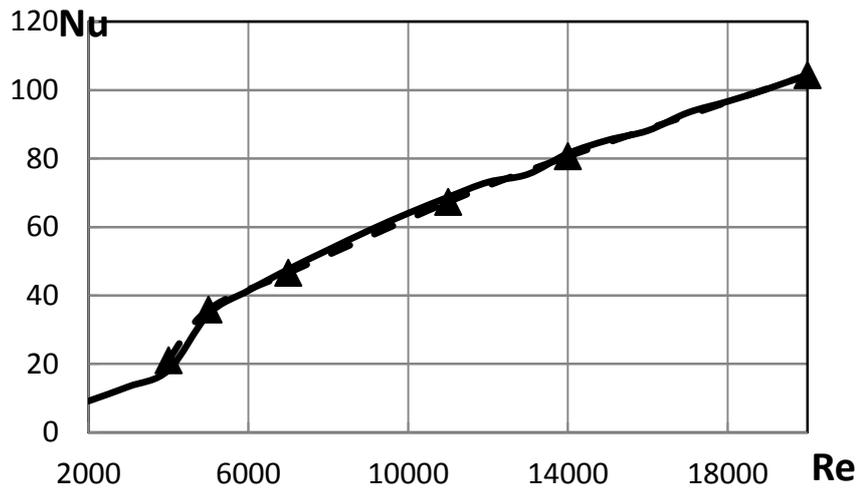


Рис. 9. Сравнение расчётных данных (сплошная линия) по теплообмену для плоских каналов с турбулизаторами при $h/D_3=0,056$; $t/D_3=0,28$; $Re=2 \cdot 10^3 \div 2 \cdot 10^4$; $Pr=0,72$ с соответствующими экспериментальными данными [3-4] (пунктирная линия)

Fig. 9. Comparison of calculated data (solid line) on heat transfer for flat channels with turbulators at $h / DE = 0.056$; $t / DE = 0.28$; $Re = 2 \cdot 10^3 \div 2 \cdot 10^4$; $Pr = 0.72$ with corresponding experimental data [3-4] (dashed line)

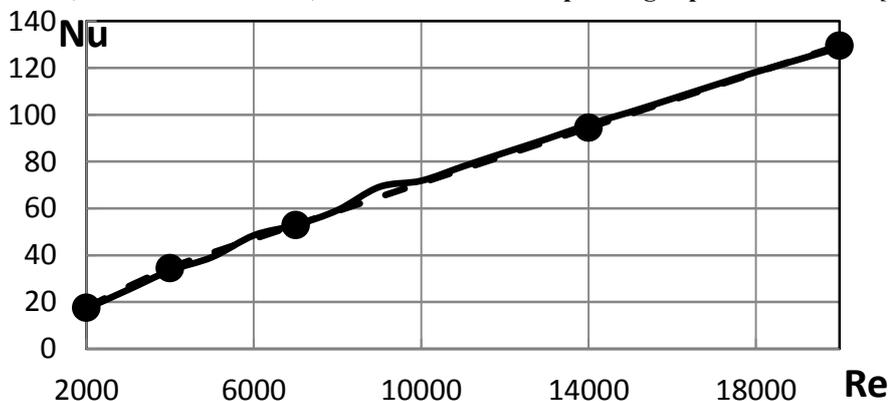


Рис. 10. Сравнение расчётных данных (сплошная линия) по теплообмену для плоских каналов с турбулизаторами при $h/D_3=0,056$; $t/D_3=0,56$; $Re=2 \cdot 10^3 \div 2 \cdot 10^4$; $Pr=0,72$ с соответствующими экспериментальными данными [3, 4] (пунктирная линия)

Fig. 10. Comparison of calculated data (solid line) on heat transfer for flat channels with turbulators at $h / DE = 0.056$; $t / DE = 0.56$; $Re = 2 \cdot 10^3 \div 2 \cdot 10^4$; $Pr = 0.72$ with the corresponding experimental data [3-4] (dashed line)

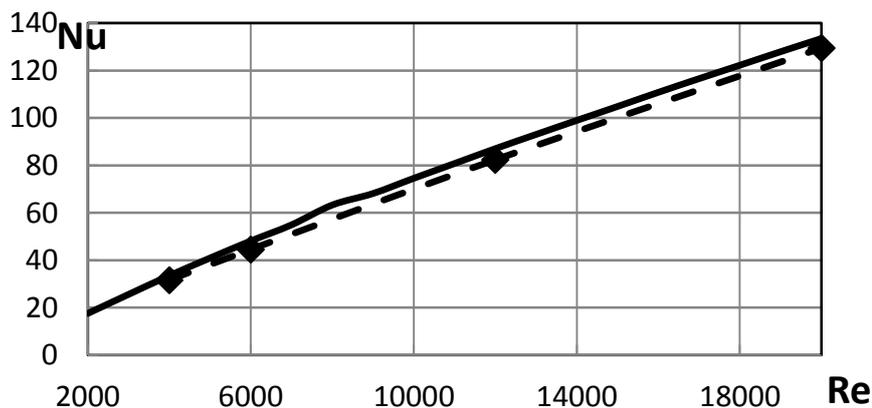


Рис. 11. Сравнение расчётных данных (сплошная линия) по теплообмену для плоских каналов с турбулизаторами при $h/D_3=0,056$; $t/D_3=0,84$; $Re=2 \cdot 10^3 \div 2 \cdot 10^4$; $Pr=0,72$ с соответствующими экспериментальными данными [3, 4] (пунктирная линия)

Fig. 11. Comparison of calculated data (solid line) on heat transfer for flat channels with turbulators at $h / DE = 0.056$; $t / DE = 0.84$; $Re = 2 \cdot 10^3 \div 2 \cdot 10^4$; $Pr = 0.72$ with the corresponding experimental data [3-4] (dashed line)

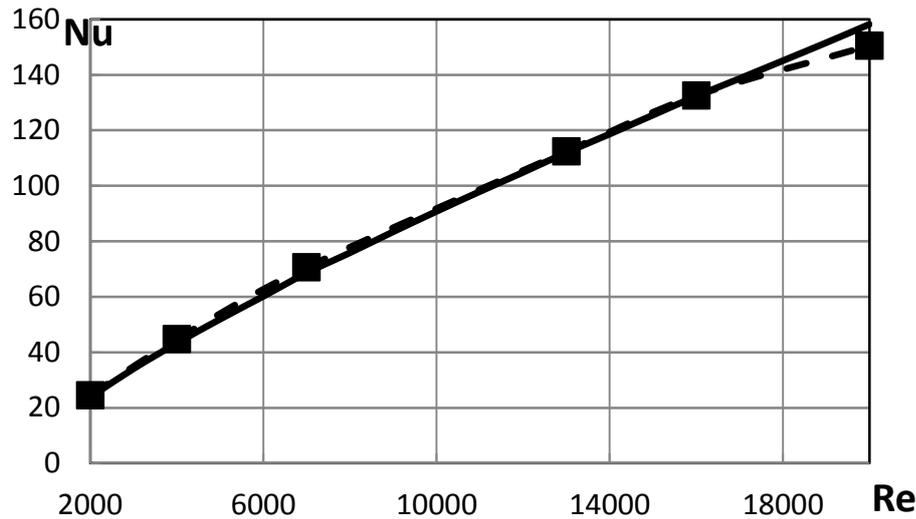


Рис. 12. Сравнение расчётных данных (сплошная линия) по теплообмену для плоских каналов с турбулизаторами при $h/D_{\text{э}}=0,102$; $t/D_{\text{э}}=1,02$; $Re=2 \cdot 10^3 \div 2 \cdot 10^4$; $Pr=0,72$ с соответствующими экспериментальными данными [3, 4] (пунктирная линия)

Fig. 12. Comparison of calculated data (solid line) on heat transfer for flat channels with turbulators at $h / D_E = 0,102$; $t / D_E = 1.02$; $Re = 2 \cdot 10^3 \div 2 \cdot 10^4$; $Pr = 0.72$ with the corresponding experimental data [3-4] (dashed line)

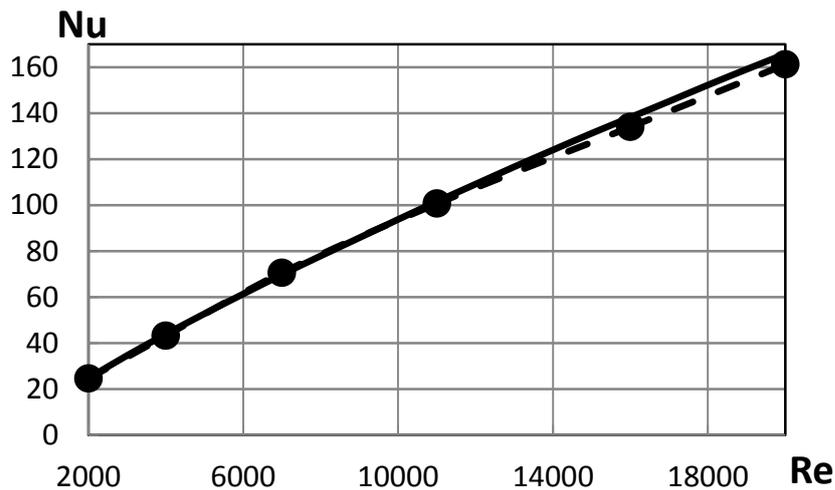


Рис. 13. Сравнение расчётных данных (сплошная линия) по теплообмену для плоских каналов с турбулизаторами при $h/D_{\text{э}}=0,102$; $t/D_{\text{э}}=2,04$; $Re=2 \cdot 10^3 \div 2 \cdot 10^4$; $Pr=0,72$ с соответствующими экспериментальными данными [3, 4] (пунктирная линия)

Fig. 13. Comparison of calculated data (solid line) on heat transfer for flat channels with turbulators at $h / D_E = 0,102$; $t / D_E = 2.04$; $Re = 2 \cdot 10^3 \div 2 \cdot 10^4$; $Pr = 0.72$ with the corresponding experimental data [3-4] (dashed line)

Сначала необходимо сравнить расчётные данные по теплообмену для плоских каналов без турбулизаторов с соответствующими экспериментальными данными [3-4] для данного диапазона определяющих параметров. Из рис. 8 отчетливо видно, что расчётные данные для плоского канала без турбулизаторов, полученные по разработанной в исследовании теории, соответствуют с экспериментом при расхождении порядка 5%. Следовательно, данная теория адекватно описывает теплообмен в плоских каналах без турбулизаторов в рассматриваемом диапазоне определяющих параметров, что обуславливает правомерность её дальнейшего применения для расчёта теплообмена в плоских каналах с турбулизаторами. В дальнейшем необходимо сравнить расчётные данные по теплообмену для плоских каналов, но уже при наличии двусторонних симметричных турбулизаторов с соответствующими экспериментальными данными [3, 4] для исследуемого диапазона определяющих параметров: $h/D_{\text{э}}=0,056 \div 0,102$; $t/D_{\text{э}}=0,28 \div 2,04$; $Re=5 \cdot 10^3 \div 2 \cdot 10^4$ $Pr=0,72$.

Как видно из рис. 9-13, расчётные данные очень хорошо коррелируют с существующим экспериментом [3-4] для плоских каналов с двусторонними симметричными турбулизаторами, что обуславливает её правомерное применение на тех же основаниях в более широком диапазоне, чем в эксперименте. Кроме представленного сравнения теории с экспериментом для представленного интервала определяющих параметров, было проведено аналогичное сопоставление для ограниченного числа экспериментальных значений для более широкого диапазона чисел Рейнольдса, Прандтля и геометрических характеристик двойных турбулизаторов в плоских каналах [1-2, 5-10], показавшее довольно адекватное соответствие сгенерированной теории существующему экспериментальному материалу. В дальнейшем значения расчётов для плоского канала с двойными симметричными турбулизаторами сравниваются с аналогичными данными для круглой трубы с турбулизаторами (табл. 2); иными словами: сравнивается турбулизация потока для осевой и плоской симметрии. Анализ расчётных данных, представленных в табл. 2, показывает, что круглая труба с турбулизаторами предпочтительнее плоского канала с двусторонними симметричными турбулизаторами при прочих равных условиях, поскольку большее увеличение интенсифицированного теплообмена достигается при меньшем увеличении интенсифицированного гидравлического сопротивления.

Таблица 2. Сравнение расчётных данных по гидравлическому сопротивлению и теплообмену для плоских каналов с двусторонними симметричными турбулизаторами с аналогичными данными для круглых труб с кольцевыми турбулизаторами (для сравнения приведены соответствующие данные для плоских каналов и круглых труб без турбулизаторов), полученные теоретическим методом, основанном на решении факторизованном конечно-объёмным методом уравнений Рейнольдса, замыкаемых с помощью модели переноса сдвиговых напряжений Ментера, и уравнения энергии на разномасштабных пересекающихся структурированных сетках

Table 2. Comparison of calculated data on hydraulic resistance and heat transfer for flat channels with double-sided symmetric turbulators with similar data for round pipes with ring turbulators (for comparison, corresponding data for flat channels and round pipes without turbulators are given) factorized by the finite-volume method of the Reynolds equations, closed using the Menter shear stress transfer model, and the energy equation at times large intersecting structured meshes

Re	h/D_3	t/D_3	Pr	ξ	Nu	КАНАЛ
$5 \cdot 10^3$	0,056	0,28	0,72	0,08312	34,52	плоский
$5 \cdot 10^3$	0,056	0,28	0,72	0,06422	40,16	труба
$5 \cdot 10^3$	0,056	0,28	10	0,08312	160,9	плоский
$5 \cdot 10^3$	0,056	0,28	10	0,06422	184,64	труба
10^4	0,056	0,28	0,72	0,08414	64,02	плоский
10^4	0,056	0,28	0,72	0,06516	74,48	труба
10^4	0,056	0,28	10	0,08414	270,6	плоский
10^4	0,056	0,28	10	0,06516	303,2	труба
$2 \cdot 10^4$	0,056	0,28	0,72	0,07524	104,52	плоский
$2 \cdot 10^4$	0,056	0,28	0,72	0,06468	131,42	труба
$2 \cdot 10^4$	0,056	0,28	10	0,07524	410	плоский
$2 \cdot 10^4$	0,056	0,28	10	0,06468	486,8	труба
$5 \cdot 10^3$	0,056	0,56	0,72	0,2028	39,18	плоский
$5 \cdot 10^3$	0,056	0,56	0,72	0,17354	47,68	труба
$5 \cdot 10^3$	0,056	0,56	10	0,2028	156,72	плоский
$5 \cdot 10^3$	0,056	0,56	10	0,17354	183,96	труба
10^4	0,056	0,56	0,72	0,219	71,78	плоский
10^4	0,056	0,56	0,72	0,18524	87	труба
10^4	0,056	0,56	10	0,219	25,96	плоский
10^4	0,056	0,56	10	0,18524	302,2	труба
$2 \cdot 10^4$	0,056	0,56	0,72	0,2298	128,76	плоский
$2 \cdot 10^4$	0,056	0,56	0,72	0,19156	156,5	труба
$2 \cdot 10^4$	0,056	0,56	10	0,2298	429	плоский
$2 \cdot 10^4$	0,056	0,56	10	0,19156	504,8	труба
$5 \cdot 10^3$	0,056	0,84	0,72	0,3014	40,92	плоский
$5 \cdot 10^3$	0,056	0,84	0,72	0,2504	48,72	труба
$5 \cdot 10^3$	0,056	0,84	10	0,3014	150,72	плоский
$5 \cdot 10^3$	0,056	0,84	10	0,2504	175,06	труба
10^4	0,056	0,84	0,72	0,325	74,56	плоский
10^4	0,056	0,84	0,72	0,2678	88,52	труба

продолжение таблицы 2.
 continuation of Table 2.

10 ⁴	0,056	0,84	10	0,325	254,6	плоский
10 ⁴	0,056	0,84	10	0,2678	292,8	труба
2·10 ⁴	0,056	0,84	0,72	0,3486	133,48	плоский
2·10 ⁴	0,056	0,84	0,72	0,2878	159,34	труба
2·10 ⁴	0,056	0,84	10	0,3486	428,6	плоский
2·10 ⁴	0,056	0,84	10	0,2878	503,4	труба
5·10 ³	0,102	1,02	0,72	0,818	51,94	плоский
5·10 ³	0,102	1,02	0,72	0,7958	63,14	труба
5·10 ³	0,102	1,02	10	0,818	168,7	плоский
5·10 ³	0,102	1,02	10	0,7958	198,84	труба
10 ⁴	0,102	1,02	0,72	0,8466	90,8	плоский
10 ⁴	0,102	1,02	0,72	0,8034	110,86	труба
10 ⁴	0,102	1,02	10	0,8466	279	плоский
10 ⁴	0,102	1,02	10	0,8034	334	труба
2·10 ⁴	0,102	1,02	0,72	0,8466	158,24	плоский
2·10 ⁴	0,102	1,02	0,72	0,7986	194,1	труба
2·10 ⁴	0,102	1,02	10	0,8466	479	плоский
2·10 ⁴	0,102	1,02	10	0,7986	573,8	труба
5·10 ³	0,102	2,04	0,72	1,3556	52,7	плоский
5·10 ³	0,102	2,04	0,72	1,3388	63,3	труба
5·10 ³	0,102	2,04	10	1,3556	158,64	плоский
5·10 ³	0,102	2,04	10	1,3388	188,9	труба
5·10 ³	0,102	2,04	10	1,3388	188,9	труба
10 ⁴	0,102	2,04	0,72	1,5008	93,72	плоский
10 ⁴	0,102	2,04	0,72	1,4574	113,56	труба
10 ⁴	0,102	2,04	10	1,5008	280,2	плоский
10 ⁴	0,102	2,04	10	1,4574	333,6	труба
2·10 ⁴	0,102	2,04	0,72	1,5894	165,7	плоский
2·10 ⁴	0,102	2,04	0,72	1,524	201,4	труба
2·10 ⁴	0,102	2,04	10	1,5894	478,2	плоский
2·10 ⁴	0,102	2,04	10	1,524	570,6	труба
5·10 ³	гладкая поверхность		0,72	0,06904	17,36	плоский
5·10 ³	гладкая поверхность		0,72	0,04176	19,16	труба
5·10 ³	гладкая поверхность		10	0,06904	49,99	плоский
5·10 ³	гладкая поверхность		10	0,04176	53,93	труба
10 ⁴	гладкая поверхность		0,72	0,05582	28,76	плоский
10 ⁴	гладкая поверхность		0,72	0,03287	31,57	труба
10 ⁴	гладкая поверхность		10	0,05582	89,22	плоский
10 ⁴	гладкая поверхность		10	0,03287	95,85	труба
2·10 ⁴	гладкая поверхность		0,72	0,04609	48,18	плоский
2·10 ⁴	гладкая поверхность		0,72	0,02675	52,87	труба
2·10 ⁴	гладкая поверхность		10	0,04609	159,1	плоский
2·10 ⁴	гладкая поверхность		10	0,02675	170,8	труба

Различие в уровне интенсификации для труб с турбулизаторами и плоских каналов с турбулизаторами на воздухе и воде составляет порядка (1ч7)%, в то время как соответствующие данные для гладких каналов составило (2ч3)%.

Расхождения по гидравлическому сопротивлению для плоских каналов с турбулизаторами с аналогичными данными для круглых труб с турбулизаторами снижается при увеличении относительной высоты турбулизатора и уменьшения относительного шага между турбулизаторами. Отношение относительных значений теплообмена и гидросопротивления для труб и кольцевых каналов $(Nu_T/Nu_P)/(\xi_T/\xi_P)$, где индекс «т» означает — труба, «п» — плоский канал, уменьшается при применении в них турбулизаторов потока, особенно для относительно больших высот турбулизаторов. Следовательно, плоский канал с двусторонними симметричными турбулизаторами имеет преимущество перед плоским каналом с гладкими стенками, и опреде-

лненным образом приближается к круглой трубе с турбулизаторами при увеличении относительных высот турбулизаторов и увеличении относительного шага между турбулизаторами.

Таблица 3. Расчётные данные по гидравлическому сопротивлению и теплообмену при малых числах Прандтля для плоских каналов с двусторонними симметричными турбулизаторами и круглых труб с турбулизаторами, полученные теоретическим методом, основанном на решении факторизованном конечно-объёмным методом уравнений Рейнольдса, замыкаемых с помощью модели переноса сдвиговых напряжений Ментера, и уравнения энергии на разномасштабных пересекающихся структурированных сетках

Table 3. Design data on hydraulic resistance and heat transfer at small Prandtl numbers for flat channels with double-sided symmetric turbulators and round tubes with turbulators, obtained by a theoretical method based on solving the Reynolds equations factorized using the shift transport model by a finite-volume method Menter stresses, and the energy equations on multi-scale intersecting structured grids

Re	$h/D_{\text{э}}$	$t/D_{\text{э}}$	Pr	ξ	Nu	КАНАЛ
10^4	0,056	0,56	0,1	0.18524	25.70	труба
10^4	0,102	1,02	0,1	0.80340	31.88	труба
10^4	гладкая поверхность		0,1	0.07340	23.08	труба
10^4	0,056	0,56	0,1	0.21900	21.82	плоский
10^4	0,102	1,02	0,1	0.84660	27.72	плоский
10^4	гладкая поверхность		0,1	0.11164	20.84	плоский
10^4	0,056	0,56	0,01	0.18524	9.17	труба
10^4	гладкая поверхность		0,01	0.07340	10.81	труба
10^4	0,056	0,56	0,01	0.21900	8.718	плоский
10^4	гладкая поверхность		0,01	0.11164	9.01	плоский

В дальнейшем были получены расчётные значения для плоского канала с двойными симметричными турбулизаторами для малых чисел Прандтля, характерных для жидких металлов (табл. 3). Анализ представленных в табл. 3 расчётных данных показывает, что уровень интенсификации теплообмена для жидких металлов гораздо меньше, чем для газообразных теплоносителей и теплоносителей в виде капельных жидкостей (напр., как в табл. 2) как для плоских каналов с двусторонними симметричными турбулизаторами, так и для круглых труб с турбулизаторами.

Например, при $Pr=0,1$ и $h/D_{\text{э}}=0,102$; $t/D_{\text{э}}=1,02$; $Re=10^4$ теплообмен интенсифицируется довольно незначительно, в то время как гидравлическое сопротивление увеличивается практически на порядок. Для ещё более малых чисел Прандтля $Pr=0,01$ и $h/D_{\text{э}}=0,056$; $t/D_{\text{э}}=0,56$; $Re=10^4$ также сохраняется тенденция снижения интенсификации теплообмена по отношению к гладкому плоскому каналу при ощутимом увеличении гидравлического сопротивления. Для круглой трубы с турбулизаторами тенденция изменения соответствующих относительных показателей для малых чисел Прандтля проявляется ещё больше, чем для плоских каналов с двойными симметричными турбулизаторами. Для малых значений чисел Прандтля можно сделать тот же вывод, что и для более высоких чисел Прандтля: круглая труба с турбулизаторами предпочтительнее плоского канала с двусторонними симметричными турбулизаторами при прочих равных условиях, поскольку большее увеличение теплообмена происходит при меньшем увеличении гидравлического сопротивления.

Сопоставление расчётных данных по интенсифицированному теплообмену при турбулентном течении в плоских каналах с двойными турбулизаторами с аналогичными данными для круглых труб с турбулизаторами для широкого диапазона определяющих параметров $h/d_{\text{э}}=0,025 \div 0,050$; $t/d_{\text{э}}=0,25 \div 1,00$; $re=10^4 \div 10^6$; $pr=0,72 \div 10$.

После проведения верифицированных экспериментом расчётов интенсифицированных гидросопротивления и теплообмена для плоских каналов с двусторонними симметричными турбулизаторами потока квадратного сечения и сопоставления с соответствующими данными для круглых труб с турбулизаторами, есть все основания для решения задачи об аналогичном сопоставлении, но для несколько более широкого диапазона определяющих параметров, —

$h/D_э=0,025$ ч $0,050$; $t/D_э=0,25$ ч $1,00$; $Re=10^4$ ч 10^6 ; $Pr=0,72$ ч 10 — но для турбулизаторов полукруглого поперечного сечения, поскольку данные характеристики актуальны для труб с диафрагмами [1, 2].

Температурный фактор (отношение температуры стенки к среднemasсовой температуре)
 $\frac{T_c}{T} = 2$.

С этой целью в табл. 4 приведены соответствующие данные по относительному теплообмену $Nu_{п}/Nu_{т}$ (индексы: «п» — плоский канал; «т» — труба) и гидравлическому сопротивлению $\xi_{п}/\xi_{т}$; для сравнения приведены относительные расчётные данные для гладких труб и плоских каналов.

Как показывают представленные в табл. 4 расчётные данные, для круглых труб и плоских каналов с гладкими стенками отношение гидравлического сопротивления $\xi_{п}/\xi_{т}$ для воздуха увеличивается с увеличением числа Рейнольдса довольно значительно при несколько большем увеличении относительного теплообмена $Nu_{п}/Nu_{т}$; для воды вышеуказанные значения для гидравлического сопротивления несколько ниже, чем для воздуха, и сопровождаются меньшим увеличением относительного теплообмена.

Таблица 4. Расчётные данные по относительному теплообмену $Nu_{п}/Nu_{т}$ и гидравлическому сопротивлению $\xi_{п}/\xi_{т}$ для круглых труб с диафрагмами и плоских каналов с двусторонними полукруглыми турбулизаторами при $h/D_э=0,025$ ч $0,050$; $t/D_э=0,25$ ч $1,00$; $Re=10^4$ ч 10^6 ; $Pr=0,72$ ч 10 (для сравнения приведены аналогичные расчётные данные для гладких труб и плоских каналов)

Table 4. Calculated data on the relative heat exchange $Nu_{п} / Nu_{т}$ and hydraulic resistance $\xi_{п} / \xi_{т}$ for round pipes with diaphragms and flat channels with double-sided semi-round turbulators at $h / DE = 0.025$ ч 0.050 ; $t / DE = 0,25$ ч $1,00$; $Re = 104$ ч 106 ; $Pr = 0.72$ ч 10 (for comparison, the corresponding calculated data for smooth pipes and flat channels are given)

Re	Pr	$h/D_э$	$t/D_э$	$\xi_{п}/\xi_{т}$	$Nu_{п}/Nu_{т}$
10^4	0,72	0	—	1,428	0,676
10^5	0,72	0	—	1,589	0,789
10^6	0,72	0	—	1,655	0,805
10^4	10	0	—	1,422	0,789
10^5	10	0	—	1,564	0,848
10^6	10	0	—	1,652	0,876
10^4	0,72	0,025	0,25	1,777	0,627
10^5	0,72	0,025	0,25	1,185	0,681
10^6	0,72	0,025	0,25	1,191	0,728
10^4	10	0,025	0,25	1,311	0,850
10^5	10	0,025	0,25	1,180	0,800
10^6	10	0,025	0,25	1,110	0,781
10^4	0,72	0,025	0,50	1,146	0,617
10^5	0,72	0,025	0,50	1,232	0,754
10^6	0,72	0,025	0,50	1,248	0,782
10^4	10	0,025	0,50	1,189	0,745
10^5	10	0,025	0,50	1,206	0,808
10^6	10	0,025	0,50	1,250	0,831
10^4	0,72	0,025	1,00	1,362	0,703
10^5	0,72	0,025	1,00	1,393	0,834
10^6	0,72	0,025	1,00	1,408	0,846
10^4	10	0,025	1,00	1,238	0,750
10^5	10	0,025	1,00	1,233	0,799
10^6	10	0,025	1,00	1,229	0,816
10^4	0,72	0,050	0,25	1,171	0,767
10^5	0,72	0,050	0,25	1,164	0,742
10^6	0,72	0,050	0,25	1,035	0,709
10^4	10	0,050	0,25	1,171	0,834
10^5	10	0,050	0,25	1,164	0,820
10^6	10	0,050	0,25	1,126	0,793
10^4	0,72	0,050	0,50	1,177	0,805
10^5	0,72	0,050	0,50	1,211	0,818
10^6	0,72	0,050	0,50	1,236	0,825
10^4	10	0,050	0,50	1,148	0,835
10^5	10	0,050	0,50	1,202	0,814
10^6	10	0,050	0,50	1,240	0,829
10^4	0,72	0,025	1,00	1,258	0,834
10^5	0,72	0,025	1,00	1,280	0,842
10^6	0,72	0,025	1,00	1,310	0,852
10^4	10	0,025	1,00	1,249	0,863
10^5	10	0,025	1,00	1,344	0,888
10^6	10	0,025	1,00	1,303	0,858

Относительные показатели для круглых труб и плоских каналов с полукруглыми турбулизаторами количественно будут другими, чем для тех же условий, но для каналов с гладкими

стенками, но качественно будет сохраняться следующее: при прочих равных условиях относительное гидравлическое сопротивление $\xi_{\text{П}}/\xi_{\text{Т}} > 1$ сопровождается более низкими значениями относительного теплообмена $\text{Nu}_{\text{П}}/\text{Nu}_{\text{Т}} < 1$ (табл. 4), что указывает на преимущество круглой трубы перед плоским каналом при прочих равных условиях, как для гладких каналов, так и для каналов с турбулизаторами.

В табл. 4 представлены расчётные данные по относительным гидравлическому сопротивлению и теплообмену представлены как для турбулизаторов относительно небольших высот ($h/D_{\text{Э}}=0,025$), так и для относительно больших высот ($h/D_{\text{Э}}=0,050$); для относительно малых ($h/D_{\text{Э}}=0,25$), относительно средних ($h/D_{\text{Э}}=0,50$) и относительно больших шагов ($h/D_{\text{Э}}=1,00$) между турбулизаторами; для небольших ($\text{Re}=10^4$), средних ($\text{Re}=10^5$) и больших ($\text{Re}=10^6$) чисел Рейнольдса; для газообразных теплоносителей ($\text{Pr}=0,72$) и теплоносителей в виде капельных жидкостей ($\text{Pr}=10$).

Анализ представленных в табл. 4 расчётных интенсифицированного теплообмена в круглых трубах и плоских каналов с турбулизаторами показал следующее.

Для каналов с относительно невысокими турбулизаторами с относительно малыми шагами относительное гидравлическое сопротивление для воздуха при увеличении числа Рейнольдса увеличивается незначительно при значительном увеличении относительного теплообмена; для воды ситуация обратная: с увеличением числа Рейнольдса относительное гидросопротивление снижается при несколько меньшем снижении относительного теплообмена.

Для каналов с относительно невысокими турбулизаторами с относительно средними шагами относительное гидравлическое сопротивление для воздуха при увеличении числа Рейнольдса увеличивается уже в значительной мере при очень большом увеличении относительного теплообмена; для воды данная закономерность сохраняется, но в ощутимо меньшей степени.

Для каналов с относительно невысокими турбулизаторами с относительно большими шагами относительное гидравлическое сопротивление для воздуха при увеличении числа Рейнольдса увеличивается в несколько большей степени, чем для относительно малых шагов, но в меньшей, чем для относительно средних, при таком же характере изменения относительного теплообмена; для воды относительное гидравлическое сопротивление практически не снижается при заметном повышении относительного теплообмена.

Для каналов с относительно высокими турбулизаторами с относительно малыми шагами относительное гидравлическое сопротивление для воздуха при увеличении числа Рейнольдса ощутимо снижается при несколько меньшем снижении относительного теплообмена; для воды снижение гидравлического сопротивления небольшое при несколько большем снижении относительного теплообмена.

Для каналов с относительно высокими турбулизаторами с относительно средними шагами относительное гидравлическое сопротивление для воздуха при увеличении числа Рейнольдса незначительно увеличивается при ещё менее значительном увеличении относительного теплообмена; для воды увеличение относительного гидросопротивления будет несколько большим при почти не снижающемся относительном теплообмене.

Для каналов с относительно высокими турбулизаторами с относительно большими шагами относительное гидравлическое сопротивление для воздуха при увеличении числа Рейнольдса увеличивается в ещё меньшей степени, чем для турбулизаторов с относительно средним шагом, при ещё меньшем увеличении относительного теплообмена; для воды увеличение относительного гидравлического сопротивления несколько большее, чем для воздуха, при почти не увеличивающемся значении относительного теплообмена.

Вышеприведённые данные указывают на то, что относительное гидросопротивление для каналов с турбулизаторами всегда ниже, чем для гладких каналов; относительный теплообмен для каналов с турбулизаторами может быть больше, чем для гладких каналов может быть, как для воздуха, но в большей степени для воды. Последнее обуславливает более оптимальное соотношение между теплообменом и гидравлическим сопротивлением для каналов с турбулизаторами по отношению к гладким каналам.

Влияние числа Прандтля на относительное гидравлическое сопротивление можно оха-

рактизовать следующим образом (табл. 4): увеличение числа Прандтля приводит, как правило, к незначительному снижению относительного гидравлического сопротивления для относительно малых высот турбулизаторов и к незначительному увеличению для относительно больших высот турбулизаторов. Относительный теплообмен при увеличении числа Прандтля увеличивается при относительно малых и средних шагах между турбулизаторами, причём это увеличение снижается с увеличением относительной высоты турбулизатора. Для относительно больших шагов между турбулизаторами относительный теплообмен, как правило, снижается для относительно малых высот турбулизаторов и незначительно увеличивается для относительно больших.

Увеличение относительного шага между турбулизаторами приводит, как правило, к увеличению, как относительного гидравлического сопротивления, так и относительного теплообмена. Увеличение относительной высоты турбулизаторов приводит, как правило, к незначительному снижению относительного гидравлического сопротивления, но к довольно значительному увеличению относительного теплообмена.

Общий анализ представленных в табл. 4 данных показывает, что относительное гидравлическое сопротивление $\xi_{\text{П}}/\xi_{\text{T}}$ для каналов с турбулизаторами всегда выше, чем для гладких каналов, однако, относительный теплообмен $\text{Nu}_{\text{П}}/\text{Nu}_{\text{T}}$ может для каналов с турбулизаторами быть выше, чем для гладких каналов, что косвенно указывает на более оптимальное перераспределение температурного напора по сечению канала при интенсифицированном теплообмене (ср., напр., для круглых труб с диафрагмами [39-40]).

Вывод: В работе была сгенерирована теоретическая математическая модель расчёта для интенсифицированного теплообмена при турбулентном течении для плоского канала с симметрично расположенными на обеих его сторонах турбулизаторами в зависимости от геометрических параметров канала и режимов течения теплоносителя.

Были получены результаты расчёта интенсифицированного теплообмена в плоских каналах с двойными турбулизаторами в зависимости от определяющих параметров очень хорошо согласующиеся с существующим экспериментальным материалом и имеющие перед последними неоспоримое преимущество, поскольку допущения, принятые при их выводе, охватывают гораздо более широкий диапазон определяющих параметров, чем ограничения, имеющиеся в экспериментах ($\text{Pr}=0,7\text{ч}100$; $\text{Re}=10^3\text{ч}10^6$; $h/d_{\text{Э}}=0,005\text{ч}0,2$; $t/h=1\text{ч}200$).

По результатам расчётов на основе разработанной модели можно осуществлять оптимизацию интенсификации теплообмена в плоских каналах с двойными турбулизаторами, а также управлять процессом интенсификации теплообмена.

Были проведены сравнительные расчёты интенсифицированных гидросопротивления и теплообмена для плоских каналов с двусторонними симметричными турбулизаторами потока с соответствующими данными для круглых каналов с турбулизаторами и проведён их анализ.

С точки зрения интенсификации теплообмена при прочих равных условиях имеет место редукция плоского канала с двусторонними симметричными турбулизаторами по отношению к круглой трубе с турбулизаторами, т.к. меньшее увеличение теплообмена достигается при большем увеличении гидравлического сопротивления.

Расчётным путём установлено, что относительное гидравлическое сопротивление $\xi_{\text{П}}/\xi_{\text{T}}$ для каналов с турбулизаторами всегда выше, чем для гладких каналов, однако, относительный теплообмен $\text{Nu}_{\text{П}}/\text{Nu}_{\text{T}}$ может для каналов с турбулизаторами быть выше, чем для гладких каналов, поэтому имеет место более оптимальное перераспределение температурного напора по сечению канала при интенсифицированном теплообмене.

Разработанный в данном исследовании теоретический метод, основанный на решении факторизованным конечно-объёмным методом уравнений Рейнольдса, замыкаемых с помощью модели переноса сдвиговых напряжений Менгера, и уравнения энергии на разномасштабных пересекающихся структурированных сетках, позволяет с приемлемой точностью проводить расчеты коэффициентов теплоотдачи и гидравлического сопротивления в плоских каналах с практически любыми формами двойных симметрично расположенных турбулизаторов потока.

Библиографический список:

1. Эффективные поверхности теплообмена / Э.К.Калинин, Г.А.Дрейцер, И.З. Копп, и др. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 408 с.
2. Калинин Э.К., Дрейцер Г.А., Ярхо С.А. Интенсификация теплообмена в каналах. – М.: Машиностроение, 1972. – 220 с.
3. Han J.C., Park J.S., Ibrahim M.Y. Measurement of heat transfer and pressure drop in rectangular channel with turbulence promoters // NASA Contactor Rep. 4015. Texas AEM University College Station. – Texas, 1986. – 200 p.
4. Han J.C., Park J.S. Developing heat transfer in rectangular channels with rib turbulators // Int. J. Heat Mass Transfer. – 1988. –V. 31. – № 1. – P. 183–195.
5. Павловский В.Г., Дедусенко Ю.М. Теплообмен и гидравлическое сопротивление в коротком плоскопараллельном канале с искусственно шероховатыми стенками // Инженерно-физический журнал. – 1969. – Т. XVII. – № 6. – С. 1098–1101.
6. Павловский В.Г. Определение тепловой эффективности турбулизации воздушного потока в гидродинамическом начальном участке плоскопараллельного канала // Депон. ВИНТИ АН СССР. – 1969. – № 630.
7. Сукомел А.С., Величко В.И., Абросимов Ю.Г. Теплообмен и трение при турбулентном течении газа в коротких каналах. – М.: Энергия, 1979. – 216 с.
8. Величко В.И., Пронин В.А. Расчёт теплоотдачи в плоском канале с отрывом и присоединением воздушного потока // Межвузовский тематический сборник научных трудов № 54. Интенсификация тепломассообмена в энергетических установках. – М.: МЭИ, 1985. – С.84–91.
9. Мигай В.К. К теории теплообмена в турбулентном потоке с отрывом // Известия АН СССР. Механика жидкости и газа. – 1967. – № 2. – С. 170–174.
10. Мигай В.К., Фирсова Э.В. Теплообмен и гидравлическое сопротивление в пучках труб. – Л.: Наука, 1986. – 195 с.
11. Лобанов И.Е., Мякочин А.С., Низовитин А.А. Моделирование интенсифицированного теплообмена при турбулентном течении в трубах с турбулизаторами на базе уравнения баланса турбулентной пульсационной энергии // Вестник МАИ. – 2007. – Т. 14. – № 4. – С. 13–22.
12. Лобанов И.Е., Дрейцер Г.А. Математическое моделирование предельного теплообмена за счёт турбулизации потока при турбулентном течении в плоских каналах с односторонними турбулизаторами // Техника и технология. – 2010. – № 5. – С. 19–31.
13. Лобанов И.Е., Парамонов Н.В. Математическое моделирование предельного теплообмена за счёт турбулизации потока при турбулентном течении в плоских каналах с турбулизаторами на одной поверхности // 9-я Международная конференция "Авиация и космонавтика – 2010". 16–18 ноября 2010 год. Москва. Тезисы докладов. – СПб.: Мастерская печати, 2010. – С. 170–171.
14. Лобанов И.Е., Флейтлих Б.Б. Моделирование интенсифицированного теплообмена при турбулентном течении в плоских каналах с периодически поверхностно расположенными турбулизаторами потока на базе семислойной модели турбулентного пограничного слоя // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2011. – № 2 (286). – С. 42–50.
15. Лобанов И.Е., Флейтлих Б.Б. Моделирование интенсифицированного теплообмена при турбулентном течении в плоских каналах с периодически поверхностно расположенными турбулизаторами потока на базе семислойной модели турбулентного пограничного слоя // Проблемы газодинамики и теплообмена в энергетических технологиях: тезисы Международной научной школы (Москва, 5–7 сентября 2011 г.). – М.: Издательский дом МЭИ, 2011. – С. 50–52.
16. Лобанов И.Е. Теория теплообмена при турбулентном течении в плоских каналах с поверхностно расположенными односторонними турбулизаторами потока на базе семислойной модели турбулентного пограничного слоя // Московское научное обозрение. – 2012. – № 4. – Часть 1. – С. 7–12.
17. Лобанов И.Е. Аналитическое решение задачи об интенсифицированном теплообмене при турбулентном течении в плоских каналах с периодически поверхностно расположенными турбулизаторами потока на базе семислойной модели турбулентного пограничного слоя // Научное обозрение. – 2012. – № 2. – С. 375–387.
18. Лобанов И.Е. Теплообмен при турбулентном течении в плоских каналах с равномерно расположенными поверхностными односторонними турбулизаторами потока // Вестник машиностроения. – 2012. – № 8. – С. 13–17.
19. Лобанов И.Е. Моделирование интенсифицированного теплообмена при турбулентном течении в плоских каналах с периодически поверхностно расположенными турбулизаторами потока на базе семислойной модели турбулентного пограничного слоя с корреляцией с кольцевым каналом // Московское научное обозрение. – 2012. – № 12. – Том 1. – С. 11–19.
20. Лобанов И.Е. Аналитическое решение задачи об интенсифицированном теплообмене в плоских каналах с односторонними поверхностными турбулизаторами потока // Отраслевые аспекты технических наук. – 2013. – № 2. – С. 4–13.
21. Лобанов И.Е. Математическое моделирование предельного теплообмена при искусственной турбулизации потока в плоских каналах с турбулизаторами на обеих сторонах // Альманах современной науки и образования. – Тамбов: Грамота, 2010. – № 7 (38). – С. 62–71.
22. Лобанов И.Е. Математическое моделирование предельного теплообмена за счёт турбулизации потока при турбулентном течении в плоских каналах с турбулизаторами на обеих поверхностях // 9-я Международная конференция "Авиация и космонавтика – 2010". 16–18 ноября 2010 год. Москва. Тезисы докладов. – СПб.: Мастерская печати, 2010. – С. 202–203.
23. Дрейцер Г.А., Исаев С.А., Лобанов И.Е. Расчёт конвективного теплообмена в трубе с периодическими выступами // Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках: Труды XIV Школы-семинара молодых учёных и специалистов под руководством академика РАН А.И.Леонтьева. – М.: МЭИ, 2003. – Т. 1. – С. 57–60.
24. Дрейцер Г.А., Исаев С.А., Лобанов И.Е. Расчёт конвективного теплообмена в трубе с периодическими выступами // Вестник МАИ. – 2004. – Т. 11. – № 2. – С. 28–35.
25. Дрейцер Г.А., Исаев С.А., Лобанов И.Е. Расчёт конвективного теплообмена в трубе с периодически расположенными поверхностными турбулизаторами потока // Теплофизика высоких температур. – 2005. – Т. 43. – № 2. – С. 223–230.
26. Калинин Э.К., Лобанов И.Е. Проблемы исследования теплообменных процессов при течениях однофазных сред на этапе успешного развития численного моделирования // Тезисы докладов и сообщений VI Минского международного форума по тепломассообмену. – Минск, 2008. – Т. 1. – С. 101–103.
27. Калинин Э.К., Лобанов И.Е. Проблемы исследования теплообменных процессов при течениях однофазных сред на этапе успешного развития численного моделирования // Труды VI Минского международного форума по тепломассообмену. –

- Минск, 2008. – Секция № 1. Конвективный теплообмен. – Доклад № 1–27. – С. 1–10.
28. Вихревая интенсификация конвективного теплообмена при турбулентном течении воздуха и масла в трубах и каналах с периодическими элементами дискретной шероховатости / С.А.Исаев, А.С. Мякочин, А.А. Низовитин, И.Е.Лобанов, О.А.Бояркина // Труды Пятой Российской национальной конференции по теплообмену. В 8 томах. Том 6. Интенсификация теплообмена. Радиационный и сложный теплообмен. – М.: МЭИ, 2010. – С. 84–87.
29. Интенсификация теплообмена в трубах с объёмными и поверхностными вихрегенераторами для неоднородных теплоносителей / С.А.Исаев, П.А. Баранов, М.А.Готовский, А.С.Мякочин, А.А.Низовитин, И.Е.Лобанов // Теплообмен и гидродинамика в закрученных потоках: Четвёртая международная конференция: тезисы докладов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2011. – С. 66.
30. Интенсификация теплообмена в трубах с объёмными и поверхностными вихрегенераторами для неоднородных теплоносителей / С.А.Исаев, П.А. Баранов, М.А.Готовский, А.С.Мякочин, А.А.Низовитин, И.Е.Лобанов // Теплообмен и гидродинамика в закрученных потоках: Четвёртая международная конференция: сборник докладов. – М., 2011. – Секция 2. – Доклад № 20. – С. 1–34.
31. Лобанов И.Е. Теоретическое исследование структуры вихревых зон между периодическими, поверхностно расположенными турбулизаторами потока прямоугольного поперечного сечения // Известия вузов. Авиационная техника. – 2011. – № 4. – С. 64–66.
32. Лобанов И.Е., Калинин Э.К. Теоретическое исследование, сопоставление с экспериментом линий тока и составляющих кинетической энергии турбулентных пульсаций в вихревых структурах в трубах с турбулизаторами // Отраслевые аспекты технических наук. – 2011. – № 12. – С. 4–15.
33. Лобанов И.Е. Моделирование структуры вихревых зон между периодическими поверхностно расположенными турбулизаторами потока прямоугольного поперечного сечения // Математическое моделирование. – 2012. – Т. 24. – № 7. – С. 45–58.
34. Лобанов И.Е. Математическое моделирование структуры вихревых зон между периодическими поверхностно расположенными турбулизаторами потока полукруглого и квадратного поперечного сечения // Отраслевые аспекты технических наук. – 2012. – № 9. – С. 11–30.
35. Лобанов И.Е. Математическое моделирование интенсифицированного теплообмена при турбулентном течении в каналах: Диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук. – М.: МАИ, 2005. – 632 с.
36. Лобанов И.Е., Штейн Л.М. Перспективные теплообменные аппараты с интенсифицированным теплообменом для металлургического производства. (Общая теория интенсифицированного теплообмена для теплообменных аппаратов, применяемых в современном металлургическом производстве.) В 4-х томах. Том I. Математическое моделирование интенсифицированного теплообмена при турбулентном течении в каналах с применением основных аналитических и численных методов. – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2009. – 405 с.
37. Численное моделирование вихревой интенсификации теплообмена в пакетах труб / Ю.А.Быстров, С.А.Исаев, Н.А.Кудрявцев и др. – СПб: Судостроение, 2005. – 398 с.
38. Ashrafiyan A., Andersson H.I. Roughness Effects in Turbulent Channel Flow // *Turbulence, Heat Transfer and Mass Transfer* 4. – New York, Wellington (UK): Begell House Inc., 2003. – P. 425–432.
39. Лобанов И.Е., Парамонов Н.В. Математическое моделирование интенсифицированного теплообмена при течении в каналах на основе сложных моделей турбулентного пограничного слоя. – М.: Издательство МАИ, 2011. – 160 с.
40. Лобанов И.Е. Моделирование интенсифицированного теплообмена и его стратификации при турбулентном течении в трубах с турбулизаторами в широком диапазоне геометрических и режимных параметров // Отраслевые аспекты технических наук. – 2012. – № 8. – С. 3–22.

References:

1. Kalinin E.K., Dreytser G.A., Kopp I.Z. idr. Effektivnye poverkhnosti teploobmena. M.: Energoatomizdat; 1998. 408 s. [Kalinin E.K., Dreytser G.A., Kopp I.Z. et al. Effective heat-exchange surfaces. Moscow: Energoatomizdat; 1998. 408 p. (in Russ.)]
2. Kalinin E.K., Dreytser G.A., Yarkho S.A. Intensifikatsiya teploobmena v kanalakh. M.: Mashinostroyeniye; 1972. 220 s. [Kalinin E.K., Dreytser G.A., Yarkho S.A. Intensification of heat transfer in the channels. M.: Mashinostroyeniye; 1972. 220 p. (in Russ.)]
3. Han J.C., Park J.S., Ibrahim M.Y. Measurement of heat transfer and pressure drop in rectangular channel with turbulence promoters. NASA Contractor Rep. 4015. Texas AEM University College Station. 1986. 200 p.
4. Han J.C., Park J.S. Developing heat transfer in rectangular channels with rib turbulators. *Int. J. Heat Mass Transfer*. 1988; 31(1):183 - 195.
5. Pavlovskii V.G., Dedusenko Yu.M. Teploobmen i gidravlichesкое soprotivlenie v korotkom ploskoparallel'nom kanale s iskusstvenno sherokhovatyimi stenkami. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal*. 1969; XVII(6):1098 - 1101. [Pavlovskii V.G., Dedusenko Yu.M. Heat transfer and hydraulic resistance in a short plane-parallel channel with artificially rough walls. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 1969; XVII(6):1098 - 1101 (in Russ.)]
6. Pavlovskii V.G. Opredelenie teplovoi effektivnosti turbulizatsii vozdušnogo potoka v gidrodinamicheskom nachal'nom uchastke ploskoparallel'nogo kanala. Depon. VINITI AN SSSR. 1969. № 630. [Pavlovskii V.G. Determination of the thermal efficiency of the turbulence of the air flow in the hydrodynamic initial section of the plane-parallel channel. Deposited in VINITI AN SSSR. 1969. № 630. (in Russ.)]
7. Sukomel A.S., Velichko V.I., Abrosimov Yu.G. Teploobmen i trenie pri turbulentnom techenii gaza v korotkikh kanalakh. M.: Energiya; 1979. 216 s. [Sukomel A.S., Velichko V.I., Abrosimov Yu.G. Heat transfer and friction in turbulent gas flow in short channels. M.: Energiya; 1979. 216 p. (in Russ.)]
8. Velichko V.I., Pronin V.A. Raschet teplootdachi v ploskom kanale s otryvom i prisoedineniem vozdušnogo potoka. Mezhdunarodnii tematicheskii sbornik nauchnykh trudov "Intensifikatsiya teploobmena v energeticheskikh ustanovkakh". M.: MEI; 1985; 54:84 - 91. [Velichko V.I., Pronin V.A. Calculation of heat transfer in a flat channel with separation and addition of air flow. International thematic collection of scientific papers "Intensification of heat and mass transfer in power plants". M.: MEI; 1985; 54:84 - 91. (in Russ.)]
9. Migai V.K. K teorii teploobmena v turbulentnom potoke s otryvom. *Izvestiya AN SSSR. Mekhanika zhidkosti i gaza*. 1967; 2:170 - 174. [Migai V.K. To the theory of heat transfer in a turbulent flow with separation. *Izvestiya AN SSSR. Mekhanika zhidkosti i gaza*.

1967;2:170 - 174. (in Russ.)]

10. Migai V.K., Firsova E.V. Teploobmen i gidravlichesкое soprotivlenie v puchkakh trub. L.: Nauka; 1986. 195 s. [Migai V.K., Firsova E.V. Heat transfer and hydraulic resistance in pipe stacks. L.: Nauka; 1986. 195 p. (in Russ.)]

11. Lobanov I.E., Myakochin A.S., Nizovitin A.A. Modelirovanie intensifitsirovannogo teploobmena pri turbulentnom techenii v trubakh s turbulizatorami na baze uravneniya balansa turbulentnoi pul'satsionnoi energii. Vestnik MAI. 2007;14(4):13 - 22. [Lobanov I.E., Myakochin A.S., Nizovitin A.A. Modeling of intensified heat transfer in turbulent flow in pipes with turbulators based on the balance equation of turbulent pulsating energy. Vestnik MAI. 2007;14(4):13 - 22. (in Russ.)]

12. Lobanov I.E., Dreitser G.A. Matematicheskoe modelirovanie predel'nogo teploobmena za schet turbulizatsii potoka pri turbulentnom techenii v ploskikh kanalakh s odnostoronnimi turbulizatorami. Tekhnika i tekhnologiya. 2010;5:19 - 31. [Lobanov I.E., Dreitser G.A. Mathematical modeling of limiting heat transfer due to flow turbulence under turbulent flow in flat channels with one-side turbulators. Engineering & Technologies. 2010;5:19 - 31. (in Russ.)]

13. Lobanov I.E., Paramonov N.V. Matematicheskoe modelirovanie predel'nogo teploobmena za schet turbulizatsii potoka pri turbulentnom techenii v ploskikh kanalakh s turbulizatorami na odnoi poverkhnosti. Tezisy dokladov 9 Mezhdunarodnoi konferentsii "Aviatsiya i kosmonavtika - 2010". SPb.: Masterskaya pechati; 2010. S. 170—171. [Lobanov I.E., Paramonov N.V. Mathematical modeling of limiting heat transfer due to flow turbulence under turbulent flow in flat channels with turbulators located on one surface. Abstracts of the 9th International Conference "Aviation and Cosmonautics - 2010". SPb.: Masterskaya pechati; 2010. P. 170 - 171. (in Russ.)]

14. Lobanov I.E., Fleytlikh B.B. Modelirovanie intensifitsirovannogo teploobmena pri turbulentnom techenii v ploskikh kanalakh s periodicheskopoverkhnostnorasplozhennymi turbulizatorami potokanabazesemisloynoymodeliturbulentnogopogranichnogosloya. Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii. 2011;2(286):42-50. [Lobanov I.E., Fleytlikh B.B. Modeling of intensified heat-exchange under the turbulent flow in the flat channels with flow turbulizators, periodically situated on the surface, based on 7-layer model of turbulent boundary layer. Fundamental and Applied Problems of Technics and technology. 2011;2(286):42-50. (in Russ.)]

15. Lobanov I.E., Fleytlikh B.B. Modelirovanie intensifitsirovannogo teploobmena pri turbulentnom techenii v ploskikh kanalakh s periodicheski poverkhnostno rasplozhennymi turbulizatorami potoka na baze semisloynoy modeli turbulentnogo pogranichnogosloya. Tezisy Mezhdunarodnoy nauchnoy shkoly "Problemy gazodinamiki i teploobmena v energeticheskikh tekhnologiyakh". Moskva; 2011. S. 50-52. [Lobanov I.E., Fleytlikh B.B. Modeling of intensified heat-exchange under the turbulent flow in the flat channels with flow turbulizators, periodically situated on the surface, based on 7-layer model of turbulent boundary layer. Abstracts of International scientific school "Problems of gas dynamics and heat-exchange in energetic technologies". Moscow; 2011. P. 50-52. (in Russ.)]

16. Lobanov I.E. Teoriya teploobmena pri turbulentnom techenii v ploskikh kanalakh s poverkhnostnorasplozhennymi i odnostoronnimi turbulizatorami potoka na baze semisloynoy modeli turbulentnogo pogranichnogosloya. Moskovskoe nauchnoe obozrenie. 2012;4(1):7-12. [Lobanov I.E. Theory of heat exchange under turbulent flow in flat channels with with single-sided flow turbulizators, situated on the surface, based on 7-layer model of turbulent boundary layer. Moskovskoe nauchnoe obozrenie. 2012;4(1):7-12. (in Russ.)]

17. Lobanov I.E. Analiticheskoe reshenie zadachi ob intensifitsirovannom teploobmene pri turbulentnom techenii v ploskikh kanalakh s periodicheskopoverkhnostnorasplozhennymi turbulizatorami potokanabazesemisloynoymodeliturbulentnogopogranichnogosloya. Nauchnoe obozrenie. 2012;2:375-387. [Lobanov I.E. Analytical solution of the problem of intensified heat exchange under turbulent flow in flat channels with flow turbulizators, periodically situated on the surface, based on 7-layer model of turbulent boundary layer. Science review. 2012;2:375-387. (in Russ.)]

18. Lobanov I.E. Teploobmen pri turbulentnom techenii v ploskikh kanalakh s ravnomernorasplozhennymi i poverkhnostnymi odnostoronnimi turbulizatorami potoka. Vestnik mashinostroeniya. 2012;8:13-17. [Lobanov I.E. Heat exchange under turbulent flow in flat channels with evenly situated surface single-sided flow turbulizators. Russian Engineering Research. 2012;8:13-17. (in Russ.)]

19. Lobanov I.E. Modelirovanie intensifitsirovannogo teploobmena pri turbulentnom techenii v ploskikh kanalakh s periodicheskimi poverkhnostno rasplozhennymi turbulizatorami potoka na baze semisloinoi modeli turbulentnogo pogranichnogosloya s korrelyatsiei s kol'tsevyim kanalom. Moskovskoe nauchnoe obozrenie. 2012;12(1):11 - 19. [Lobanov I.E. Modeling of intensified heat transfer in turbulent flow in flat channels with periodic superficially located flow turbulizators based on a seven-layer model of a turbulent boundary layer with correlation with a ring channel. Moskovskoe nauchnoe obozrenie. 2012;12(1):11 - 19. (in Russ.)]

20. Lobanov I.E. Analiticheskoe reshenie zadachi ob intensifitsirovannom teploobmene v ploskikh kanalakh s odnostoronnimi poverkhnostnymi turbulizatorami potoka. Otrasleyve aspekty tekhnicheskikh nauk. 2013;2:4 - 13. [Lobanov I.E. Analytical solution of the problem of intensified heat exchange in flat channels with one-side surface flow turbulizators. Otrasleyve aspekty tehniceskikh nauk. 2013;2:4 - 13. (in Russ.)]

21. Lobanov I.E. Matematicheskoe modelirovanie predel'nogo teploobmena pri iskusstvennoi turbulizatsii potoka v ploskikh kanalakh s turbulizatorami na obeikh storonakh. Al'manakh sovremennoi nauki i obrazovaniya. 2010;7(38):62 - 71. [Lobanov I.E. Mathematical modeling of limiting heat transfer during artificial flow turbulence in flat channels with turbulizators on both sides. Al'manakh sovremennoi nauki i obrazovaniya. 2010;7(38):62 - 71. (in Russ.)]

22. Lobanov I.E. Matematicheskoe modelirovanie predel'nogo teploobmena za schet turbulizatsii potoka pri turbulentnom techenii v ploskikh kanalakh s turbulizatorami na obeikh poverkhnostnyakh. Tezisy dokladov 9 Mezhdunarodnoi konferentsii "Aviatsiya i kosmonavtika - 2010". S-Pb.: Masterskaya pechati; 2010. S. 202 - 203. [Lobanov I.E. Mathematical modeling of the limit heat transfer due to flow turbulence under turbulent flow in flat channels with turbulizators on both surfaces. Abstracts of the 9th International Conference "Aviation and Cosmonautics - 2010". S-Pb.: Masterskaya pechati; 2010. P. 202 - 203. (in Russ.)]

23. Dreitser G.A., Isaev S.A., Lobanov I.E. Raschet konvektivnogo teploobmena v trubakh s periodicheskimi vystupami. Problemy gidrodinamiki teploobmenavenergeticheskikh ustanovkakh. M.: Izd. MEI; 2003;1:57-60. [Dreitser G.A., Isaev S.A., Lobanov I.E. Calculation of convective heat exchange in pipes with periodical protrusions. The problems of hydro-dynamics and heat exchange in energetic facilities. Moscow: Izd. MEI; 2003;1:57-60. (in Russ.)]

24. Dreitser G.A., Isaev S.A., Lobanov I.E. Raschet konvektivnogo teploobmena v trube s periodicheskimi vystupami. Vestnik MAI. 2004;11(2):28 - 35. [Dreitser G.A., Isaev S.A., Lobanov I.E. Calculation of convective heat transfer in a pipe with periodical protrusions. Vestnik MAI. 2004;11(2):28 - 35. (in Russ.)]

25. Dreitser G.A., Isaev S.A., Lobanov I.E. Raschet konvektivnogo teploobmena v trube s periodicheski rasplozhennymi poverkhnostnymi turbulizatorami potoka. Teplofizika vysokikh temperatur. 2005;43(2):223 - 230. [Dreitser G.A., Isaev S.A., Lobanov I.E. Calculation of convective heat transfer in a pipe with periodically located surface flow turbulizators. High Temperature. 2005;43(2):223 - 230. (in Russ.)]

26. Kalinin E.K., Lobanov I.E. Problemy issledovaniya teploobmennyykh protsessov pri techeniyakh odnofaznykh sred na etape uspehnogo razvitiya chislennogo modelirovaniya. Tezisy dokladov i soobshchenii VI Minskogo mezhdunarodnogo foruma po teplomassoobmenu. Minsk. 2008;1:101 - 103. [Kalinin E.K., Lobanov I.E. Problems of investigating heat transfer processes during single-phase medium flows at the stage of successful development of numerical simulation. Abstracts of the VI Minsk International Forum on Heat and Mass Transfer. Minsk. 2008;1:101 - 103. (in Russ.)]
27. Kalinin E.K., Lobanov I.E. Problemy issledovaniya teploobmennyykh protsessov pri techeniyakh odnofaznykh sred na etape uspehnogo razvitiya chislennogo modelirovaniya. Trudy VI Minskogo mezhdunarodnogo foruma po teplomassoobmenu. Sektsiya № 1. Konvektivnyy teplomassoobmen. Minsk; 2008. Doklad № 1—27. S. 1—10. [Kalinin E.K., Lobanov I.E. Problems of investigating heat transfer processes during single-phase medium flows at the stage of successful development of numerical simulation. Proceedings of the VI Minsk International Forum on Heat and Mass Transfer. Section 1. Convective heat and mass transfer. Minsk; 2008. Report № 1 - 27. P. 1 - 10. (in Russ.)]
28. Isaev S.A., Myakochin A.S., Nizovitin A.A., Lobanov I.E., Boyarkina O.A. Vkhrevaya intensifikatsiya konvektivnogo teploobmena pri turbulentnom techenii vozdukh i masla v trubakh i kanalakh s periodicheskimi elementami diskretnoi sherokhovatosti. Trudy Pyatoi Rossiiskoi natsional'noi konferentsii po teploobmenu. V 8 tomakh. Tom 6. Intensifikatsiya teploobmena. Radiatsionnyi i slozhnyi teploobmen. M.: MEI; 2010. S. 84—87. [Isaev S.A., Myakochin A.S., Nizovitin A.A., Lobanov I.E., Boyarkina O.A. Vortex intensification of convective heat transfer in turbulent flow of air and oil in pipes and channels with periodic elements of discrete roughness. Proceedings of the Fifth Russian National Conference on Heat Transfer. In 8 volumes. Volume 6. Heat exchange intensification. Radiation and complex heat transfer. Moscow: MEI; 2010. P. 84 - 87. (in Russ.)]
29. Isaev S.A., Baranov P.A., Gotovskii M.A., Myakochin A.S., Nizovitin A.A., Lobanov I.E. Intensifikatsiya teploobmena v trubakh s ob'emnymi i poverkhnostnymi vkhregeneratorami dlya neodnorodnykh teplonositelei. Tezisy dokladov Chetvertoi mezhdunarodnoi konferentsii "Tplomassoobmen i gidrodinamika v zakruchennykh potokakh". M.: Izdatel'skii dom MEI; 2011. S. 66. [Isaev S.A., Baranov P.A., Gotovskii M.A., Myakochin A.S., Nizovitin A.A., Lobanov I.E. Intensification of heat exchange in pipes with volumetric and surface vortex generators for inhomogeneous heat carriers. Abstracts of the reports of the Fourth International Conference "Heat and mass exchange and hydrodynamics in vortex flows". Moscow: Izdatel'skii dom MEI; 2011. P. 66. (in Russ.)]
30. Isaev S.A., Baranov P.A., Gotovskii M.A., Myakochin A.S., Nizovitin A.A., Lobanov I.E. Intensifikatsiya teploobmena v trubakh s ob'emnymi i poverkhnostnymi vkhregeneratorami dlya neodnorodnykh teplonositelei. Sbornik dokladov Chetvertoi mezhdunarodnoi konferentsii "Tplomassoobmen i gidrodinamika v zakruchennykh potokakh". M., 2011. Sektsiya 2. Doklad № 20. S. 1 - 34. [Isaev S.A., Baranov P.A., Gotovskii M.A., Myakochin A.S., Nizovitin A.A., Lobanov I.E. Intensification of heat exchange in pipes with volumetric and surface vortex generators for inhomogeneous heat carriers. Collected papers of the Fourth International Conference "Heat and mass transfer and hydrodynamics in swirling flows". Moscow, 2011. Section 2. Report № 20. P. 1 - 34. (in Russ.)]
31. Lobanov I.E. Teoreticheskoe issledovanie struktury vkhrevykh zon mezhdu periodicheskimi, poverkhnostno raspolozhennymi turbulizatorami potoka pryamougol'nogo poperechnogo secheniya. Izvestiya vuzov. Aviatsionnaya tekhnika. 2011;4:64 - 66. [Lobanov I.E. Theoretical study of the structure of vortex zones between periodic, superficially located flow turbulators of a rectangular cross-sectional flow. Izv. VUZ. Aviatsionnaya Tekhnika. 2011;4:64 - 66. (in Russ.)]
32. Lobanov I.E., Kalinin E.K. Teoreticheskoe issledovanie, sopostavlenie s eksperimentom linii toka i sostavlyayushchikh kineticheskoi energii turbulentnykh pul'satsii v vkhrevykh strukturakh v trubakh s turbulizatorami. Otrasleyve aspekty tekhnicheskikh nauk. 2011;12:4 - 15. [Lobanov I.E., Kalinin E.K. Theoretical study, comparison with experiment of streamlines and components of the kinetic energy of turbulent pulsations in vortex structures in pipes with turbulators. Otrasleyve aspekty tekhnicheskikh nauk. 2011;12:4 - 15. (in Russ.)]
33. Lobanov I.E. Modelirovanie struktury vkhrevykh zon mezhdu periodicheskimi poverkhnostno raspolozhennymi turbulizatorami potoka pryamougol'nogo poperechnogo secheniya. Matematicheskoe modelirovanie. 2012;24(7):45 - 58. [Lobanov I.E. Modeling of the structure of vortex zones between periodic superficially placed flow turbulators of a rectangular cross-sectional flow. Mathematical Models and Computer Simulations. 2012;24(7):45 - 58. (in Russ.)]
34. Lobanov I.E. Matematicheskoe modelirovanie struktury vkhrevykh zon mezhdu periodicheskimi poverkhnostno raspolozhennymi turbulizatorami potoka polukruglogo i kvadratnogo poperechnogo secheniya. Otrasleyve aspekty tekhnicheskikh nauk. 2012;9:11 - 30. [Lobanov I.E. Mathematical modeling of the structure of vortex zones between periodic superficially located flow turbulators of a semi-circular and square cross-sectional flow. Otrasleyve aspekty tekhnicheskikh nauk. 2012;9:11 - 30. (in Russ.)]
35. Lobanov I.E. Matematicheskoe modelirovanie intensifitsirovannogo teploobmena pri turbulentnom techenii v kanalakh. Dissertatsiya na soiskanie uchenoy stepeni doktora tekhnicheskikh nauk. Moskva; 2005. 632 s. [Lobanov I.E. Mathematical modeling of intensified heat-exchange under the turbulent flow in the channels. Doctor of technical sciences dissertation. Moscow; 2005. 632 p. (in Russ.)]
36. Lobanov I.E., Shteyn L.M. Perspektivnye teploobmennye apparatsintensifitsirovannym teploobmenom dlya metallurgicheskogo proizvodstva. (Obschchayateoriya intensifitsirovannogo teploobmenadlyateploobmennyykh apparatov, primenyaemykh v sovremennom metallurgicheskome proizvodstve.) V 4-khtomakh. Tom I. Matematicheskoe modelirovanie intensifitsirovannogo teploobmenapri turbulentnom techenii v kanalakh s primeneniemosnovnykh analiticheskikh chislennykh metodov. M.: Izdatel'stvo Assotsiatsii stroitel'nykh vuzov; 2009. 405 s. [Lobanov I.E., Shteyn L.M. Perspective heat-exchange apparatus with intensified heat-exchange for metallurgical production. (General theory of intensified heat-exchange for heat-exchange apparatus used in modern metallurgical production). In 4 volumes. Volume I. Mathematical modeling of intensified heat-exchange under the turbulent flow in channels using major analytical and numeric methods. Moscow: Izdatel'stvo Assotsiatsii stroitel'nykh vuzov; 2009. 405 p. (in Russ.)]
37. Bystrov Yu.A., Isaev S.A., Kudryavtsev H.A. i dr. Chislennoe modelirovanie vkhrevoi intensifikatsii teploobmena v paketakh trub. S-Pb: Sudostroenie; 2005. 398 s. [Bystrov Yu.A., Isaev S.A., Kudryavtsev H.A. et al. Numerical simulation of vortex intensification of heat exchange in pipe stacks. S-Pb: Sudostroenie; 2005. 398 p. (in Russ.)]
38. Ashrafian A., Andersson H.I. Roughness Effects in Turbulent Channel Flow. Turbulence, Heat Transfer and Mass Transfer 4. New York, Wellington (UK): Begell House Inc.; 2003. P. 425 - 432.
39. Lobanov I.E., Paramonov N.V. Matematicheskoe modelirovanie intensifitsirovannogo teploobmena pri techenii v kanalakh na osnove slozhnykh modelei turbulentnogo pogrannichnogo sloya. M.: Izdatel'stvo MAI; 2011. 160 s. [Lobanov I.E., Paramonov N.V. Mathematical modeling of intensified heat transfer during flow in channels based on complex models of the turbulent boundary layer. M.: Izdatel'stvo MAI; 2011. 160 p. (in Russ.)]
40. Lobanov I.E. Modelirovanie intensifitsirovannogo teploobmena i ego stratifikatsii pri turbulentnom techenii v trubakh s turbulizatorami v shirokom diapazone geometricheskikh i rezhimnykh parametrov. Otrasleyve aspekty tekhnicheskikh nauk. 2012;8:3 - 22.

[Lobanov I.E. Modeling of intensified heat exchange and its stratification under turbulent flow in pipes with turbulators in a wide range of geometric and regime parameters. Otrasleyve aspekty tehniceskikh nauk. 2012;8:3 - 22 (in Russ.)]

Сведения об авторе:

Игорь Евгеньевич Лобанов – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник проблемной научно-исследовательской лаборатории (ПНИЛ) – 204.

Information about the author.

Igor' E.Lobanov - Dr. Sci. (Technical), Leading researcher, Problematic scientific-research Laboratory – 204.

Конфликт интересов.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 26.03.2018.

Принята в печать 30.05.2018.

Conflict of interest.

The author declare no conflict of interest.

Received 26.03.2018.

Accepted for publication 30.05.2018.

Для цитирования: Асланов Г.К., Асланов Т.Г., Казибеков Р.Б., Тетакаев У.Р. Оценка ошибок, вызываемых выходом из строя элементов антенной системы аэродромного автоматического радиопеленгатора. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2018;45(2):94-103. DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-2-94-103

For citation: Aslanov G.K., Aslanov T.G., Kazibekov R.B., Tetakaev U.R. Evaluation of errors caused by failure of antenna system elements in an aerodrome automatic radio direction finder. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2018; 45 (2):94-103. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-2-94-103

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 621.396

DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-2-94-103

ОЦЕНКА ОШИБОК, ВЫЗЫВАЕМЫХ ВЫХОДОМ ИЗ СТРОЯ ЭЛЕМЕНТОВ АНТЕННОЙ СИСТЕМЫ АЭРОДРОМНОГО АВТОМАТИЧЕСКОГО РАДИОПЕЛЕНГАТОРА

Асланов Г.К.¹, Асланов Т.Г.², Казибеков Р.Б.³, Тетакаев У.Р.⁴

¹⁻⁴Дагестанский государственный технический университет,

¹⁻⁴367026, г. Махачкала, пр. Имама Шамиля, 70, Россия,

¹e-mail: uits@dstu.ru, ²e-mail: tabasik@gmail.com, ³e-mail: kazib.rus11@mail.ru

⁴e-mail: umar_tetakaev@mail.ru

Резюме: Цель. Целью исследования является разработка математической модели для определения ошибки пеленгования аэродромного автоматического радиопеленгатора (АРП) в зависимости от положения неисправного вибратора относительно пеленга на источник радиоизлучения. **Метод.** Для определения ошибки пеленгования в зависимости взаимного расположения неисправного вибратора АРП и пеленга на источник радиоизлучения используется метод разложения ступенчатой выборки фаз сигналов в ряд. Фурье. Ошибка пеленгования определяется как разность суммы первых гармоник разложения в ряд Фурье ступенчатой огибающей выборки фаз сигналов исправной и неисправной антенных систем. **Результат.** В работе получена математическая модель для определения ошибки пеленгования аэродромного автоматического радиопеленгатора (АРП), в зависимости от взаимного расположения неисправного вибратора и пеленга на источник радиоизлучения. Получен график изменения ошибки пеленгования АРП в зависимости от места положения вышедшего из строя вибратора и пеленга на источник радиоизлучения. Показано, что в АРП, работающем в квазидоплеровском режиме, выход из строя вибраторов, расположенных вдоль пеленга на источник радиоизлучения не приводит к появлению ошибки пеленгования. В АРП же, работающем в дифференциально-фазовом режиме, наоборот, выход из строя вибраторов, расположенных вдоль пеленга на источник радиоизлучения, приводит к появлению максимальной ошибки пеленгования, которая может достигать величины $3,75^{\circ}$. **Вывод.** При работе аэродромного автоматического радиопеленгатора (АРП) в квазидоплеровском режиме выход из строя вибраторов, расположенных вдоль пеленга на источник радиоизлучения не приводит к появлению ошибки пеленгования и, наоборот, при работе АРП в дифференциально-фазовом режиме это приводит к появлению максимальной ошибки пеленгования, которая может достигать величины $3,75^{\circ}$.

Ключевые слова: автоматический радиопеленгатор, антенная система, ошибки пеленгования, неисправность антенной системы

TECHNICAL SCIENCE
COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT

EVALUATION OF ERRORS CAUSED BY FAILURE OF ANTENNA SYSTEM ELEMENTS IN AN AERODROME AUTOMATIC RADIO DIRECTION FINDER

Gaidarbek K. Aslanov¹, Tagirbek G. Aslanov², Rustam B. Kazibekov³,
Umar R. Tetakaev⁴

¹⁻⁴Daghestan State Technical University,

¹⁻⁴70 I. Shamilya Ave., Makhachkala 367026, Russia,

¹e-mail: uits@dstu.ru, ²e-mail: tabasik@gmail.com, ³e-mail: kazib.rus11@mail.ru

⁴e-mail: umar_tetakaev@mail.ru

Abstract Objectives The aim of the study is to develop a mathematical model for determining the direction-finding error of an aerodrome automatic direction finder (ADF), depending on the position of the defective vibrator relative to the source of radio emission. **Methods** To determine the direction-finding error depending on the mutual location of the defective ADF vibrator and direction finding towards the radio source, the method of Fourier series expansion of step-by-step sampling of the signal phases is used. The direction-finding error is defined as the difference in the sum of the first harmonics of the phase sample's stepped envelope Fourier expansion of the fault-free and defective antenna systems. **Results** In this work, a mathematical model is obtained for determining the direction-finding error of the aerodrome automatic direction finder (ADF), depending on the mutual position of the defective vibrator and direction finding towards the radio source. The graph of the alteration of the ADF direction finding error is obtained depending on the position of the defective vibrator and the direction finding towards the source of radio emission. It is shown that during ADF operating in the quasi-Doppler mode, the failure of the vibrators located along the direction finding towards the source of radio emission does not lead to an error in direction finding. Conversely, during ADF operating in the differential-phase mode, the failure of the vibrators located along the direction finding towards the source of radio emission leads to a maximum direction-finding error, reaching 3.75ϵ . **Conclusion** When an aerodrome automatic direction finder (ADF) operates in a quasi-Doppler mode, the failure of the vibrators located along the direction finding towards the source of radio emission does not lead to an error in direction finding and, conversely, when the ADF operates in differential phase mode, this results in a maximum direction-finding error of 3.75ϵ .

Keywords: automatic direction finder, antenna system, direction finding errors, antenna system malfunction

Введение Аэродромные автоматические радиопеленгаторы (АРП) должны обладать высокой надежностью, и, в частности, каждый канал пеленгования должен обеспечивать непрерывную круглосуточную работу без отказов в течение 2000 часов. В АРП наименее ненадежным узлом является антенная система, что объясняется жесткими условиями ее эксплуатации. Выход из строя любого из элементов антенной системы приводит к появлению значительных (иногда - аномальных) ошибок в определении пеленга на источник радиоизлучения. Причиной возникновения ошибок является некорректное восстановление последетекторного сигнала, вызванного выходом из строя вибратора антенной системы, что в свою очередь является следствием конечного количества неподвижных элементов антенной системы и дискретного характера электронного сканирования.

Представляет интерес определение ошибки пеленгования, в зависимости от положения неисправного вибратора антенной системы относительно пеленга на источник радиоизлучения (при условии корректного восстановления последетекторного сигнала). В статье составлена математическая модель для определения ошибки пеленгования, в зависимости от положения неисправного вибратора и осуществлена его программная реализация. На основе разработанной программы получены кривые зависимости ошибки пеленгования от взаимного расположения

неисправного вибратора антенной и пеленга на источник радиоизлучения.

Методы исследования. Определение пеленга на воздушное судно (ВС) в АРП осуществляется по значениям разностей фаз между сигналами кольцевых и центрального вибратора антенной системы (АС), которые для квазидоплеровского режима работы определяются выражением:

$$\varphi_i = (2\pi R / \lambda) \cos \beta \cos(\theta - 2\pi(i - 1) / N), \quad i=1, N \quad (1)$$

где: R – радиус антенной решетки,

i – номер временного интервала, в течение которого коммутируется i -й элемент антенной системы,

N – количество элементов антенной системы.

λ – длина волны пеленгуемого сигнала;

β – угол места воздушного судна;

θ – пеленг на воздушное судно

Из-за дискретности процесса электронной коммутации вибраторов, огибающая выборки фаз приобретает вид ступенчатого сигнала. При этом пеленг определяется по разности фаз первой гармоники выборки фаз и опорным сигналом, соответствующей пеленгу, равному нулю. В связи с тем, что выход из строя любого из элементов антенной системы приводит к появлению значительных ошибок в определении пеленга на источник радиоизлучения, представляет интерес определение ошибки пеленгования, в зависимости от положения неисправного вибратора антенной системы относительно пеленга на источник радиоизлучения.

Постановка задачи. Для определения зависимости ошибки пеленгования от положения неисправного вибратора используется свойство линейности преобразования Фурье, в соответствии с которым первая гармоника выборки фазовой огибающей равна сумме первых гармоник составляющих ее элементарных сигналов.

Методы исследования Так как, пеленг на ВС определяется начальной фазой огибающей выборки разностей фаз сигналов АС, то оценить влияние отказа отдельных вибраторов на результат пеленгования можно осуществить сравнением изменения начальной фазы огибающей выборки разностей фаз сигналов при полностью исправной АС и при неисправном i -м вибраторе. На рис.1 приведена выборка действительных значений разностей фаз сигналов между кольцевыми и центральным вибраторами АС, с радиусом 1,6 м, при пеленговании передатчика, работающего на азимуте 0^0 , на частоте 250 мГц.

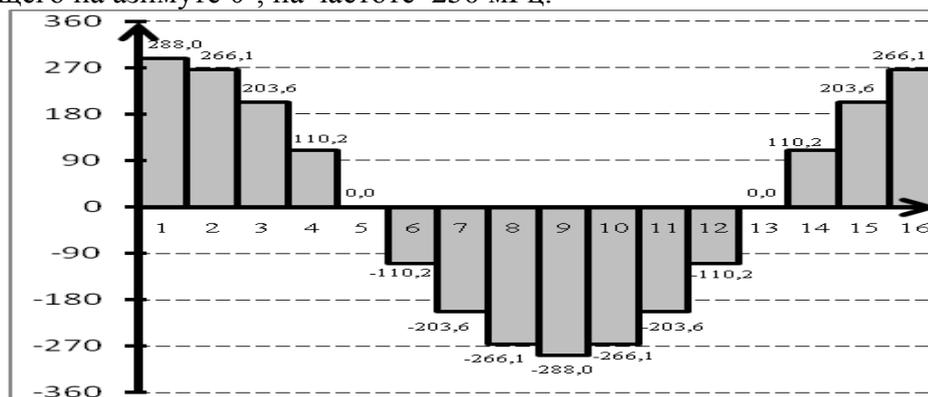


Рис.1. Выборка разностей фаз сигналов между кольцевыми и центральным вибраторами АС

Fig.1. A sample of the phase difference of the signals between the ring and center speakers АС

Однако в отечественных радиопеленгаторах для измерения разностей фаз сигналов между кольцевыми и центральным вибратором используются фазовые детекторы (ФД) с линейной характеристикой в диапазоне $0 \div 360^0$, что приводит к возникновению фазовой неоднозначности.

Математически, процесс возникновения фазовой неоднозначности в общем виде может быть представлен следующим образом:

$$\psi_i = \left\{ \begin{array}{l} \left\{ \frac{\varphi_i}{2\pi} \right\} 2\pi \text{ если } \varphi_i > 0 \\ \left\{ \frac{\varphi_i}{2\pi} \right\} 2\pi + 2\pi \text{ если } \varphi_i < 0 \\ 0 \text{ если } \varphi_i = 0 + \\ 2\pi \text{ если } \varphi_i = 0 - \end{array} \right\} \quad (1)$$

где: $\{ \}$ означает взять дробную часть;

ψ_i – разность фаз между i -м кольцевым и центральным вибраторами антенной системы с неоднозначностью, измеренная фазовым детектором;

φ_i – разность фаз между i -м кольцевым и центральным вибраторами антенной системы без неоднозначности.

Сказанное поясняется рис.2.

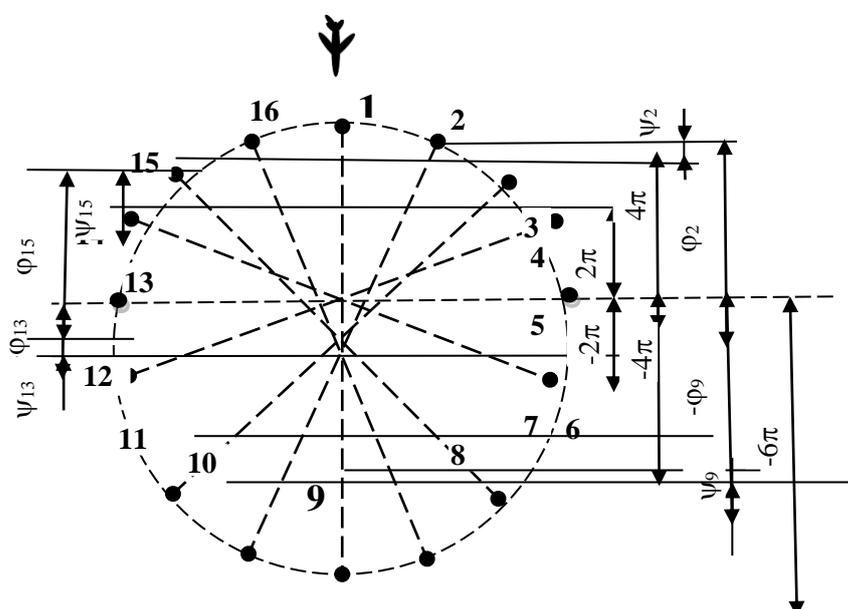


Рис.2. К пояснению возникновения фазовой неоднозначности на выходе фазового детектора
Fig.2. To clarify the occurrence of phase ambiguity at the output of the phase detector

Из рис.2 видно, что измеренные значения разностей фаз вибраторов 2, 9, 13, 15, соответственно, равны $\psi_2, \psi_9, \psi_{13}, \psi_{15}$, а действительные значения фаз, соответственно, равны $\varphi_2 = 4\pi + \psi_2, -\varphi_9 = -6\pi + \psi_9, \varphi_{13} = -2\pi + \psi_{13}, \varphi_{15} = 2\pi + \psi_{15}$

На рис. 3 приведены измеренные ФД значения разностей фаз (с неоднозначностью), соответствующие выборке приведенной на рисунке 1, при наличии помех на 5 и 13 вибраторах антенной системы, равных, соответственно -15° и $+15^\circ$.

Как видно из приведенных на рис.3 гистограмм, на выходе фазового детектора отсутствуют отрицательные значения разностей фаз. При этом, ФД при измерении разностей фаз между пятым кольцевым и центральным вибраторами вместо -15° выдает плюс 345° , а для 13-го вибратора выдаст плюс 15° .

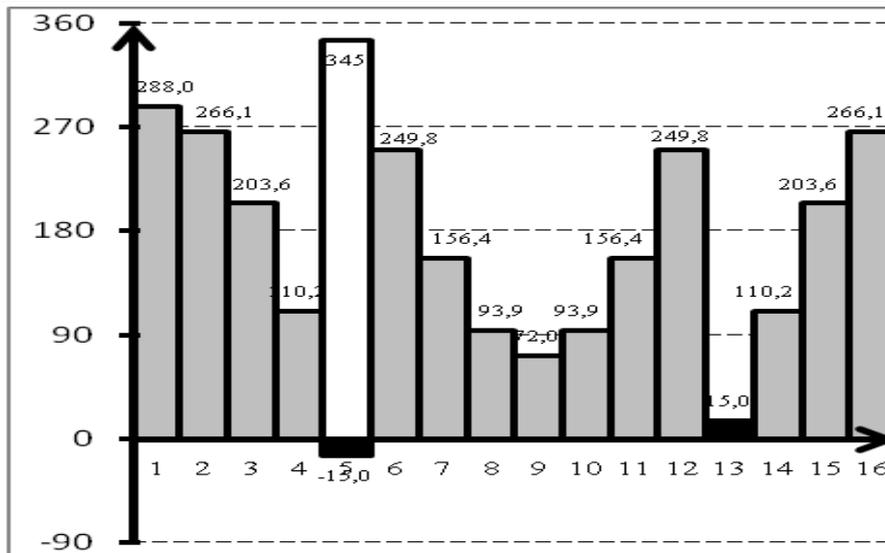


Рис.3. Выборка измеренных ФД разностей фаз сигналов между кольцевыми и центральным вибраторами АС

Fig.3. A sample of measured PD of the phase difference between the ring and central speakers of the speakers

Как видно из рис. 3, фаза вибратора, расположенного противоположно исходного, может быть вычислена по формуле:

$$\varphi_{i+\frac{N}{2}} = 360^{\circ} - \varphi_i \quad (2)$$

где: φ_i – фаза исходного вибратора;

$\varphi_{i+\frac{N}{2}}$ – фаза вибратора, расположенного противоположно исходного.

Это обстоятельство может быть использовано для восстановления значения фазы вышедшего из строя вибратора.

Так как, пеленг на ВС определяется начальной фазой огибающей выборки разностей фаз сигналов АС, то оценить влияние отказа отдельных вибраторов на результат пеленгования можно осуществить сравнением изменения начальной фазы огибающей выборки разностей фаз сигналов при полностью исправной АС и при неисправном вибраторе.

Согласно свойству линейности преобразования Фурье, первая гармоника фазовой огибающей равна сумме первых гармоник, составляющих ее элементарных сигналов.

В дальнейшем при моделировании использовалась выборка фаз сигналов, приведенная на рис. 4.

Для нахождения первых гармоник импульсов заметим, что длительность всех импульсов одинакова и равна τ , период повторения равен T , а скважность 16. Первая гармоника разложения в ряд Фурье периодического сигнала определяется по формулой:

$$s_1 = a_1 \cos(\omega t) + b_1 \sin(\omega t) \quad (3)$$

где: a_1, b_1 – коэффициенты ряда Фурье, определяемые по формулам:

$$a_i = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} s(t) \cos(i \omega t) dt \quad i = 1, 2 \dots \infty \quad (4)$$

$$b_i = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} s(t) \sin(i \omega t) dt \quad i = 1, 2, \dots, \infty \quad (5)$$

Заметим, что для всех последовательностей изображенных на рисунке 1 частота первой гармоники одинакова и равна $2\pi/T$.

Для первого импульса, подставляя в формулы 4 и 5 пределы интегрирования $(-\tau/2 \dots \tau/2)$, получим

$$a_{11} = \frac{2A_1}{\pi} \sin\left(\frac{\pi\tau}{T}\right) \quad (6)$$

$$b_{11} = 0$$

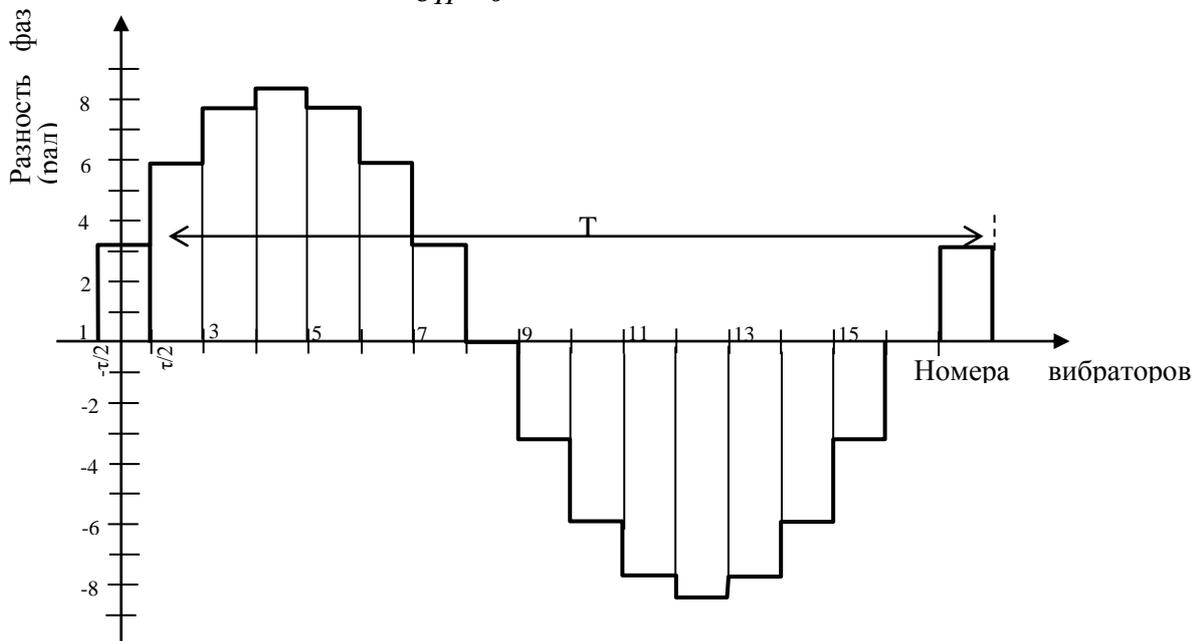


Рис.4. Выборка разностей фаз сигналов между кольцевыми и центральными вибраторами АС, используемые при моделировании

Fig.4. A sample of the phase difference of the signals between the ring and central speakers of the speakers used in the simulation

Первая гармоника импульса равна:

$$S_{11} = \frac{2A_1}{\pi} \sin\left(\frac{\pi\tau}{T}\right) \cos \omega t \quad (7)$$

Для второго импульса, подставляя пределы интегрирования $(-\tau/2+T/16 \dots \tau/2+T/16)$ и амплитуду A_2 , получим:

$$a_{21} = \frac{2A_2}{\pi} \sin\left(\frac{\pi\tau}{T}\right) \cos\left(\frac{\pi}{8}\right) \quad (8)$$

$$b_{21} = \frac{2A_2}{\pi} \sin\left(\frac{\pi\tau}{T}\right) \sin\left(\frac{\pi}{8}\right) \quad (9)$$

Первая гармоника второй последовательности равна:

$$\frac{2A_2}{\pi} \sin\left(\frac{\pi\tau}{T}\right) \cos\left(\frac{\pi}{8}\right) \cos \alpha t + \frac{2A_2}{\pi} \sin\left(\frac{\pi\tau}{T}\right) \sin\left(\frac{\pi}{8}\right) \sin(\alpha t) \quad (10)$$

Производя аналогичные вычисления для i-х импульсов получим:

$$a_{i1} = \frac{2A_i}{\pi} \sin\left(\frac{\pi\tau}{T}\right) \cos\left(\frac{(i-1)\pi}{8}\right) \quad (11)$$

$$b_{i1} = \frac{2A_i}{\pi} \sin\left(\frac{\pi\tau}{T}\right) \sin\left(\frac{(i-1)\pi}{8}\right) \quad (12)$$

Первая гармоника i-го импульса определяется:

$$\frac{2A_i}{\pi} \sin\left(\frac{\pi\tau}{T}\right) \cos\left(\frac{(i-1)\pi}{8}\right) \cos \alpha t + \frac{2A_i}{\pi} \sin\left(\frac{\pi\tau}{T}\right) \sin\left(\frac{(i-1)\pi}{8}\right) \sin \alpha t \quad (13)$$

На рис. 5 изображены первые гармоники импульсов в виде векторов с амплитудами и начальными фазами, полученными с помощью приведенных выше формул.

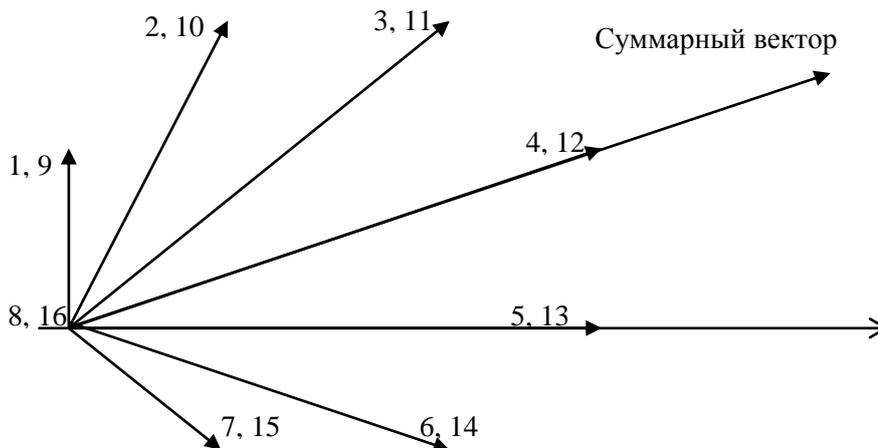


Рис.5. Векторное представление первых гармоник выборки разностей фаз сигналов АС в виде векторной диаграммы

Fig.5. Vector representation of the first harmonics of a sample of the phase difference of the AC signals in the form of a vector diagram

Числа на концах векторов соответствуют номерам вибраторов. Из векторной диаграммы следует, что импульсы с максимальной амплитудой (вибратор №4 и №12 на рис. 4) обладают первыми гармониками, совпадающими по фазе с суммарным сигналом.

Это означает, что их отказ приведет к изменению амплитуды первой гармоники суммарного сигнала, но не изменяет его фазу, что говорит о не влиянии отказа этих вибраторов на значение пеленга (т.е. выход из строя вибраторов расположенных ортогонально значению пеленга не влияет на точность определения пеленга). Данный вывод подтверждается результатами проведенного моделирования (рис. 6).

На рис.6 сплошной линией показан сигнал, являющийся суммой первых гармоник всех 16 импульсов, а пунктирной – сигнал, являющийся суммой всех импульсов, кроме 4-го и 12-го.

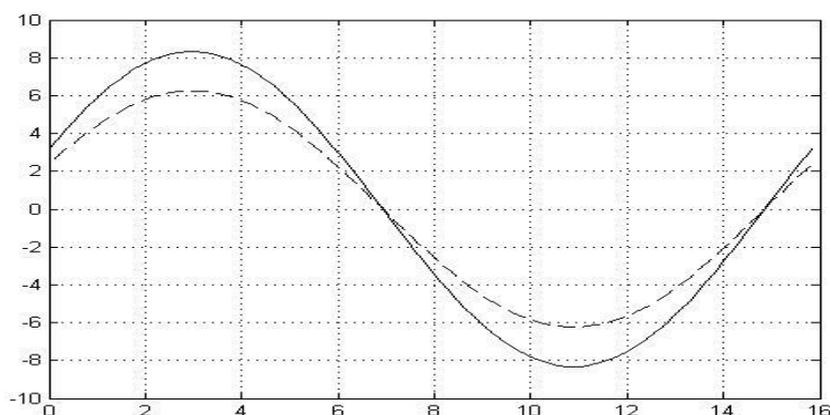


Рис.6. Влияние местоположения неисправного вибратора на точность определения пеленга
Fig.6. Influence of location of faulty vibrators on accuracy of bearing determination

На рис.7 приведены результаты моделирования зависимости ошибки пеленгования при отказе вибраторов антенной системы при различных значениях пеленгов для шестнадцати вибраторного АРП, работающего в метровом диапазоне волн.

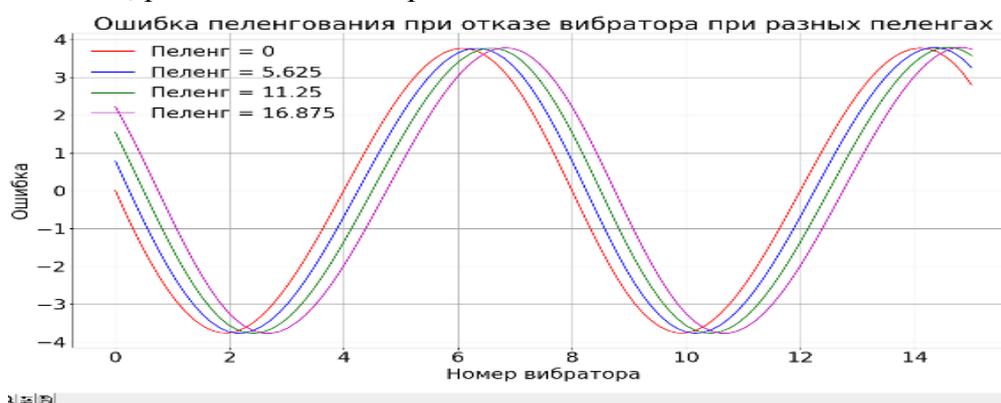


Рис.7. Результаты моделирования зависимости ошибки пеленгования при отказе вибраторов антенной системы при различных значениях пеленгов
Fig.7. The results of the simulation of the dependence of the direction finding error in case of failure of the antenna system vibrators at different values of bearings

Обсуждение результатов. В работе разработана математическая модель для определения ошибки пеленгования, в зависимости от взаимного расположения неисправного вибратора и пеленга на источник радиоизлучения. Получен график изменения ошибки пеленгования АРП в зависимости от места положения вышедшего из строя вибратора и пеленга на источник радиоизлучения.

В АРП, работающем в квазидоплеровском режиме, выход из строя вибраторов, расположенных вдоль пеленга на источник радиоизлучения не приводит к появлению ошибки пеленгования. В АРП же, работающем в дифференциально-фазовом режиме, выход из строя вибраторов, расположенных вдоль пеленга на источник радиоизлучения, приводит к появлению максимальной ошибки пеленгования, которая может достигать $3,75^{\circ}$.

Угловое расстояние между соседними вибраторами равно $22,5^{\circ}$. В работе производилось вычисление ошибок пеленгования для дискретных значений пеленга на источник радиоизлучения 0° , $5,625^{\circ}$, $11,25^{\circ}$, $16,875^{\circ}$. Для следующей пары вибраторов в соответствии с принципом относительности для пеленгов $22,5^{\circ}$, $28,125^{\circ}$, $33,75^{\circ}$, $39,375^{\circ}$, значения ошибок пеленгования будут соответственно такими же, как и для 0° , $5,625^{\circ}$, $11,25^{\circ}$, $16,875^{\circ}$.

Вывод. При работе АРП в квазидоплеровском режиме выход из строя вибраторов, расположенных вдоль пеленга на источник радиоизлучения не приводит к появлению ошибки пеленгования и, наоборот, при работе же АРП в дифференциально-фазовом режиме это приводит к появлению максимальной ошибки пеленгования, которая может достигать величины $3,75^{\circ}$

Библиографический список:

1. Асланов Г.К. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук на тему: "Прикладные методы обеспечения точностных характеристик АРП и АРПС". Московский государственный технический университет гражданской авиации. Москва 1998г.
2. Асланов Г.К., Гасанов О.И. Анализ причин возникновения аномальных ошибок в квазидоплеровских автоматических радиопеленгаторах // Научно-технические ведомости СПбГПУ, серия Информатика Телекоммуникации Управление, №2. СПб: 2009.
3. Асланов Г.К., Гасанов О.И. Выход из строя элементов антенной системы АРП как причина возникновения аномальной ошибки пеленгования // Сборник тезисов докладов XXX итоговой научно-технической конференции преподавателей, сотрудников, аспирантов и студентов ДГТУ: тезисы докладов. Часть I. Технические науки – Махачкала: ДГТУ, 2009.
4. Асланов Г.К., Гасанов О.И. Анализ ошибок автоматических радиопеленгаторов, вызываемых выходом из строя элементов антенной системы // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2008. - №11.
5. Асланов Г.К., Гасанов О.И. Улучшение технических характеристик АРП, путем его интеллектуализации // Современные информационные технологии в проектировании, управлении и экономике: материалы IV Всероссийской конференции по актуальным проблемам внедрения и развития сектора IT-технологий, 22-25 сент. 2009 г. - Махачкала: ДГТУ, 2009.
6. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике (для научных работников и инженеров). М.: Наука, 1977. .
7. Кукес И.С., Старик М.Е. Основы радиопеленгации. М., "Сов. радио",1964г.
8. Саидов А.С., Тагилаев А.Р., Алиев Н.М., Асланов Г.К. Проектирование фазовых автоматических радиопеленгаторов. Москва, Радио и связь, 1997 г.
9. Unsett U. VHF Direction Finders control shipping in North Sea and Atlantic. News from Rohde & Schwarz (1989) No.124, pp.36...37.
10. Direction finding of narrowband autoregressive sources by antenna arrays /Ziskind Ian, Bar-Ness Yeheskel // Antennas and Propag.: Int. Symp. Dig."Merg. Technol. 90's", Dallas, Tex., May 7-11, 1990. Vol. 4. - Piscataway (N.J.),1990.
11. Direction-of-arrival estimation for narrow band coherent and incoherent sources in the presence of unknown noise fields / Wang Fengzhen // Res. IEEE Int. Radar Conf., Arlington, Va, May 7-10, 1990. - New York (N. Y.), 1990.
12. Johnson,J.: R&S direction finders for Her Majesty's Coastguard. News from Rohde & Schwarz (1985) No.109, pp.36-37.
13. Mutual coupling effects on phase-only direction finding / Weiss Anthony J., Friedlander Benjamin // IEEE.Trans. Antennas and Propag. - 1992. - 40, N5.
14. Performance analysis of direction finding using lag redundancy averaging /Doron Miriam A., Weiss Anthony J., //IEEE Trans. Signal Process. - 1993. - 41, N3.
15. Precision DF safeguards North-Sea shipping. News from Rohde & Schwarz (1985) No.109, pp.35-36.

References:

1. Aslanov G.K. Prikladnye metody obespecheniya tochnostnykh kharakteristik ARP i ARPS. Avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoi stepeni doktora tekhnicheskikh nauk. Moskovskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet grazhdanskoi aviatsii. Moskva. 1998. [Aslanov G.K. Applied methods for ensuring the accuracy characteristics of ADF and ADFS. Doctor of technical sciences thesis. The Moscow State Technical University of Civil Aviation. Moscow. 1998. (in Russ.)]
2. Aslanov G.K., Gasanov O.I. Analiz prichin vozniknoveniya anomal'nykh oshibok v kvazidoplerovskikh avtomaticheskikh radiopelengatorakh. Nauchno-tekhnicheskije vedomosti SPbGPU, seriya "Informatika. Telekommunikatsii. Upravlenie". 2009;2:87-93. [Aslanov G.K., Gasanov O.I. Analysis of the causes of abnormal errors in quasi-Doppler automatic direction finders. St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunication and Control Systems.2009;2:87-93 (in Russ.)]
3. Aslanov G.K., Gasanov O.I. Vykhod iz stroya elementov antennoi sistemy ARP kak prichina vozniknoveniya anomal'noi oshibki pelengovaniya. Sbornik tezisov dokladov XXX itogovoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii prepodavatelei, sotrudnikov, aspirantov i studentov DGTU. Chast' I. Tekhnicheskije nauki. Makhachkala: DGTU; 2009. S.95-96. [Aslanov G.K., Gasanov O.I. Failure of the elements of the ADF antenna system as a cause of an abnormal direction finding error.Abstracts of XXX final scientific and technical conference of teachers, employees, post-graduate students and students of DSTU. Part I. Technical sciences. Makhachkala: DGTU; 2009. P.95-96. (in Russ.)]

4. Aslanov G.K., Gasanov O.I. Analiz oshibok avtomaticheskikh radiopelengatorov, vyzvaemykh vykhodom iz stroya elementov antennoi sistemy. Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. 2008;11:91-96. [Aslanov G.K., Gasanov O.I. The analysis of the automatic radio direction finders' errors caused by the aerial system elements' failure. Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences. 2008;11:91-96. (in Russ.)]
5. Aslanov G.K., Gasanov O.I. Uluchshenie tekhnicheskikh kharakteristik ARP, putem ego intellektualizatsii. Materialy IV Vserossiiskoi konferentsii po aktual'nym problemam vnedreniya i razvitiya sektora IT-tehnologii "Sovremennye informatsionnye tekhnologii v proektirovanii, upravlenii i ekonomike". Makhachkala: DGTU; 2009. С. 72-80. [Aslanov G.K., Gasanov O.I. Improvement of technical characteristics of ADF by its intellectualisation. Materials of IV All-Russian conference on topical problems of the introduction and development of the IT-Technology Sector "Modern Information Technologies in Design, Management and Economics". Makhachkala: DSTU; 2009. P. 72-80. (in Russ.)]
6. Korn G., Korn T. Spravochnik po matematike (dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov). M.: Nauka; 1977. [Korn G., Korn T. Handbook of mathematics (for scientists and engineers). M.: Nauka; 1977. (in Russ.)]
7. Kukes I.S., Starik M.E. Osnovy radiopelengatsii. M.: Sov. radio; 1964. [Kukes I.S., Starik M.E. Fundamentals of radio direction finding. M.: Sov. radio; 1964. (in Russ.)]
8. Saidov A.S., Tagilaev A.R., Aliev N.M., Aslanov G.K. Proektirovanie fazovykh avtomaticheskikh radiopelngatorov. Moskva: Radio i svyaz'; 1997. [Saidov A.S., Tagilaev A.R., Aliev N.M., Aslanov G.K. Design of phase automatic direction finders. Moscow: Radio i svyaz'; 1997. (in Russ.)]
9. Unsett U. VHF Direction Finders control shipping in North Sea and Atlantic. News from Rohde & Schwarz. 1989;124:36 - 37.
10. Ziskind I., Bar-Ness Y. Direction finding of narrowband autoregressive sources by antenna arrays. Antennas and Propag.: Int. Symp. Dig."Merg. Technol. 90's". Vol. 4. Dallas: Piscataway (N.J.);1990.
11. Fengzhen W. Direction-of-arrival estimation for narrow band coherent and incoherent sources in the presence of unknown noise fields. Res. IEEE Int. Radar Conf. Arlington. New York (N. Y.); 1990.
12. Johnson J. R&S direction finders for Her Majesty's Coastguard. News from Rohde & Schwarz. 1985;109:36-37.
13. Weiss A.J., Friedlander B. Mutual coupling effects on phase-only direction finding. IEEE.Trans. Antennas and Propag. 1992;40(5).
14. Doron M.A., Weiss A.J. Performance analysis of direction finding using lag redundancy averaging. IEEE Trans. Signal Process. 1993;41(3).
15. Precision DF safeguards North-Sea shipping. NewsfromRohde&Schwarz. 1985;109:35-36.

Сведения об авторах:

Асланов Гайдарбек Тагирбекович – доктор технических наук, профессор, кафедра управления и информатики в технических системах и вычислительной техники.

Асланов Тагирбек Гайдарбекович – кандидат технических наук, докторант, кафедра управления и информатики в технических системах и вычислительной техники.

Казибеков Рустам Бидирханович – аспирант, кафедра управления и информатики в технических системах и вычислительной техники.

Тетакаев Умар Резванович – аспирант, кафедра управления и информатики в технических системах и вычислительной техники.

Information about the authors.

Gaidarbek K.Aslanov – Dr.Sci. (Technical), Prof., Department of Management and Informatics in Technical Systems and Computer Engineering.

Tagirbek G.Aslanov – Cand. Sci. (Technical), Doctoral cand., Department of Management and Informatics in Technical Systems and Computer Engineering.

Rustam B.Kazibekov – Graduate Student, Department of Management and Informatics in Technical Systems and Computer Engineering.

Umar R.Tetakaev – Graduate Student, Department of Management and Informatics in Technical Systems and Computer Engineering.

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 26.02.2018.

Принята в печать 29.04.2018.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 26.02.2018.

Accepted for publication 29.04.2018.

Для цитирования: Дульцев Д.В., Сучкова Л.И. Описание и идентификация темпоральных закономерностей для нечеткого временного ряда с применением гибридных олс-паттернов. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2018;45 (2):104-113.

DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-2-104-113

For citation: Dultsev D.V, Suchkova L.I. Description and identification of temporal regularities for fuzzy time series with application of hybrid ols-patterns. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2018; 45(2):104-113. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-2-104-113

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 004.8

DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-2-104-113

ОПИСАНИЕ И ИДЕНТИФИКАЦИЯ ТЕМПОРАЛЬНЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ДЛЯ НЕЧЕТКОГО ВРЕМЕННОГО РЯДА С ПРИМЕНЕНИЕМ ГИБРИДНЫХ ОЛС-ПАТТЕРНОВ

Дульцев Д.В.², Сучкова Л.И.¹

¹⁻²Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,

¹⁻²656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46, Россия,

¹e-mail: li.suchkova@yandex.ru, ²e-mail: Lloid92@yandex.ru

Резюме Цель. Цель исследования сводится к разработке принципа хранения шаблонов данных с учетом их темпоральной природы, позволяющего сократить время принятия решений. Для описания и идентификации темпоральных закономерностей поведения нечетко заданных временных рядов в режиме реального времени поставлена задача разработать гибридную структуру данных, позволяющую учитывать последовательности нечетких значений, формируемых из четких наблюдаемых данных, длину этих последовательностей и возможные неравномерные временные промежутки между наблюдениями. **Метод.** В статье рассматривается подход к формализации описания временных причинно-следственных связей между событиями на объекте и в окружающей его среде, основанный на множестве односвязных списков триплетов. Каждый триплет содержит нечеткий терм лингвистической переменной, продолжительность его наблюдения и допустимый интервал наблюдения незначимых данных. **Результат.** Разработан алгоритм обнаружения паттернов базы знаний в реальном времени с учетом возможности временного сдвига при наблюдении длинных последовательностей идентичных значений наблюдаемой величины. Учтена возможность частичного перекрытия данных, соответствующих триплетам разных паттернов. Предложенный гибридный паттерн позволяет ускорить обнаружение темпоральных закономерностей в данных. **Вывод.** Научные результаты представляет разработанная структура хранения информации о темпоральных закономерностях в данных, основанная на односвязном линейном списке, а также алгоритм поиска закономерностей в данных наблюдений с применением набора ОЛС-паттернов. Преимуществом данной структуры и алгоритма по сравнению с известными способами хранения и анализа темпоральных данных является сокращение объема памяти, необходимой для хранения шаблонов в базе знаний, а также возможность применения ОЛС-паттернов для принятия решений.

Ключевые слова: формализация экспертных знаний, обнаружение закономерностей, гибридный подход, ОЛС-паттерн поведения, экспертные системы

TECHNICAL SCIENCE
COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT

DESCRIPTION AND IDENTIFICATION OF TEMPORAL REGULARITIES FOR FUZZY TIME SERIES WITH APPLICATION OF HYBRID OLS-PATTERNS

Denis V.Dultsev², Larisa I.Suchkova¹

¹⁻²Polzunov Altai State Technical University,

¹⁻²46 Lenina Ave., Barnaul 656038, Russia,

¹e-mail: li.suchkova@yandex.ru, ²e-mail: Lloid92@yandex.ru

Abstract Objectives The aim of the research is to develop the principle of storing data templates to take their temporal nature into account, making it possible to reduce decision-making times. In order to describe and identify temporal patterns in fuzzy time series behaviour in real time, the task was set to develop a hybrid data structure that allows for a consideration of sequences of fuzzy values formed from clear observable data as well as a determination of the length of these sequences and possible uneven time intervals between the observations. **Methods** The article discusses an approach to formalising the description of temporal cause-effect relationships between events occurring at the object location as well as that of its environment, based on a set of singly-connected lists of triplets. Each triplet contains a fuzzy linguistic variable, the duration of its observation and the permitted interval of observation of insignificant data. **Results** An algorithm for detecting knowledge base patterns in real time was developed, taking into account the possibility of a time shift in observing long sequences of identical values of the observed value. The possibility of partial data overlapping corresponding to triplets of different patterns is taken into account. The proposed hybrid pattern makes it possible to accelerate the detection of temporal regularities in the data. **Conclusion** Scientific results are presented by the developed structure for storing information on temporal regularities in data, based on a singly linked linear list, as well as an algorithm for finding regularities in observational data using a set of OLS-patterns. The advantage of this structure and algorithm in comparison with the known ways of storing and analysing temporal data is a reduction in the amount of memory necessary for storing templates in the knowledge base, as well as the possibility of applying OLS patterns for decision-making purposes.

Keywords: formalisation of expert knowledge, regularity detection, hybrid approach, OLS behaviour pattern, expert systems

Введение. В современном мире существует большое количество областей деятельности человека, которые контролируются информационно-измерительными системами. В основе таких систем лежат механизмы принятия решений, связанных с процессами выработки информирующих сообщений и управления. При принятии решений система опирается на первичные данные, полученные с датчиков или программируемых логических контроллеров, однако анализа только первичных текущих данных для формирования управляющих воздействий недостаточно, так как часто приходится учитывать ранее полученную информацию. Первичные данные помимо информационной части могут включать темпоральную составляющую, которая фиксирует, в какой момент времени данные были получены и/или обработаны.

Наиболее общим типом представления темпоральных данных являются временные ряды (ВР). ВР представляют собой наиболее высокий уровень темпоральной детализации данных, а уменьшение степени детализации ВР за счет описания темпоральных явлений в лингвистической форме, предоставляемой экспертами, позволяет находить новые знания об объекте управления и о закономерностях в данных [1- 3]. Формирование описания темпоральных явлений в лингвистической форме осуществляется с помощью лингвистических переменных, каждой из которых соответствует некоторое количество лингвистических термов (словесных значений), соответствующих различным интервалам числовых значений ВР и задаваемых с помощью функции принадлежности [4]. Преимуществом нечетко представленных временных рядов

(НВР) по сравнению с их традиционным описанием является возможность учёта неопределённости или неполноты информации о происходящем событии в условиях недостаточности объёма статистической базы, необходимой для применения традиционных вероятностных методов [5- 6].

Теории нечетких ВР были посвящены многие исследования, среди которых можно отметить следующие работы как зарубежных авторов Q. Song и B. Chisom [7], H. Tanaka [8], J. Kasprzyk [9], W. Pedrycz, M.H. Smith [10], так и отечественных ученых Н.Г. Ярушкиной, Афанасьевой Т.В., Новака В. [5, 11], И.З. Батыршина [12], С.М. Ковалева [13 - 17] и др. Одной из первых нечетких моделей являются предложенные Q. Song и B. Chisom нечеткие модели детерминированных и авторегрессионных временных рядов первого порядка, которые были применены для прогнозирования количества регистрирующихся студентов университета штата Алабама (США) [7]. В работах школы Н.Г. Ярушкиной [5, 11] раскрыты основные подходы к интеллектуальному анализу временных рядов (Time Series Data Mining), в числе которых присутствуют нечеткие модели и технологии анализа именно НВР, однако алгоритмы принятия решений при анализе предыстории генеза наблюдаемых величин подробно не рассмотрены.

И.З. Батыршиным в работе [12] рассмотрены перцептивные паттерны, основанные на восприятии понятий человеком. В них допустимы операции с числовой и лингвистической информацией, с трендами изменения значений ряда и его производных. Между паттернами восприятия существуют временные соотношения, которые могут быть выражены через отношения Аллена. ВР представляется как последовательность примитивных перцептивных паттернов, каждый из которых описывает форму тренда ряда в зависимости от знаков первой и второй производной отсчетов. Однако анализ последовательностей описаний геометрических форм для применения в информационно-измерительных системах должен быть дополнен анализом числовых коэффициентов, характеризующих параметры функций, соответствующих геометрическим формам. Учеными школы С.М. Ковалева предлагается новый подход для идентификации и прогнозирования процессов, протекающих на объекте технологического мониторинга. Указанный подход объединяет нечетко-темпоральный и лингвистический аспекты описания зависимостей в группе временных рядов [13]. В работе [14] рассмотрена задача обнаружения особых типов темпоральных паттернов во временных рядах, а именно предлагается метод анализа данных наблюдений, основанный на обучении без учителя марковской модели исследуемой системы. Также предлагается методология обнаружения аномалий на объекте наблюдения с помощью темпоральных данных, которая базируется на анализе динамики вероятностных значений аномалии с поступлением каждого нового отсчета в потоке данных. Однако для применения данной методологии необходимо накопление значительного объема данных с целью вычисления вероятностей аномалий.

Одним из способов хранения темпоральных шаблонов для группы четких и нечетких ВР является матричный паттерн [18], включающий матрицу-шаблон, матрицу-прогноз и матрицу-дескриптор шаблона. Однако наличие в матрице-шаблоне незначимых элементов повышает временные издержки на операцию сравнения реальных данных с шаблоном.

Проблема, которая решается в настоящей работе, сводится к разработке принципа хранения шаблонов данных с учетом их темпоральной природы, позволяющего сократить время принятия решений. Под темпоральностью данных понимаются такие их характеристики, как время начала наблюдения данных, длительность промежутков наблюдения одинакового значения, следование временных промежутков наблюдения различных значений, наличие временных промежутков, когда данные незначимы для принятия решений по результатам наблюдений. В качестве структуры данных для хранения темпоральных закономерностей в группе ВР в работе предлагается гибридный паттерн, представляющий собой один или группу односвязных линейных списков (ОЛС). ОЛС включает элементы, каждый из которых содержит информационную часть и указатель – адрес следующего элемента. Признаком конца ОЛС в нашем случае служит отрицательное число (например, -1) в поле элемента, отведенном для хранения указателя.

Постановка задачи. Для описания и идентификации темпоральных закономерностей поведения нечетко заданных временных рядов в режиме реального времени необходимо разра-

ботать гибридную структуру данных, позволяющую учитывать последовательности нечетких значений, формируемых из четких наблюдаемых данных, длину этих последовательностей и возможные неравномерные временные промежутки между наблюдениями. Кроме того, при анализе онлайн-данных должна обеспечиваться корректировка частоты проявления темпоральной закономерности в реальных наблюдаемых данных. Алгоритм идентификации закономерностей должен иметь невысокую временную сложность, порядок временной сложности при анализе данных на соответствие одному шаблону должен быть линейным. Для простоты рассмотрим одиночный временной ряд вида $X = x_0, x_1, \dots, x_S$, с шагом дискретизации dt . Шаг дискретизации может соответствовать либо периоду измерения некоторой величины, либо периоду вычисления величины по данным текущих или прошлых измерений. Будем считать, что темпоральная закономерность проявляется для $S + 1$ отсчетов ВР-

Методы исследования. Рассмотрим способ хранения информации о темпоральных закономерностях в нечетко представленных данных в виде линейного гибридного паттерна, а также процесс формирования новых и применения множества существующих паттернов для идентификации последовательностей событий, связанных с анализом нечеткого временного ряда, представленного в виде последовательности термов. В четком временном ряду $X = x_0, x_1, \dots, x_S$, с шагом дискретизации dt каждое значение x_i , где $i = \overline{0, S}$, соответствует моменту времени, равному $i * dt$. Четким значениям после фаззификации с применением некоторой функции принадлежности будут соответствовать термы лингвистической переменной, сопоставленной с рядом, то есть будет сформирован нечеткий временной ряд. Для простоты будем считать, что при фаззификации четкому значению соответствует терм с максимальным значением функции принадлежности. Закономерность чередования термов во времени в этом ряду можно задать односвязным линейным списком:

$$P = p_0 \rightarrow p_1 \rightarrow \dots \rightarrow p_r, \quad (1)$$

где:

r – количество элементов списка;

p_i – текущий элемент списка, представляющий триплет вида (a_i, m_i, τ_i) .

Триплет состоит из нечеткого терма a_i , числа m_i шагов дискретизации с величиной шага дискретизации dl , интервала времени τ_i до появления в НВР следующего элемента списка p_{i+1} . При задании темпоральной закономерности чередования термов в НВР сначала определяется шаг дискретизации анализа данных измерений dl . Он выбирается исходя из периодичности измерения или расчета реальных данных таким образом, чтобы было возможно анализировать отсчеты НВР на промежутках времени, превышающих временной шаг ряда dt . В общем случае шаг дискретизации для анализа термов dl больше либо равен шагу дискретизации при наблюдении реальных данных dt , и он в совокупности с величиной m_i характеризует продолжительность времени наблюдения нечетких термов a_i некоторого параметра.

Нечеткое значение a_i представляет собой терм лингвистической переменной, полученный при фаззификации числовых данных наблюдений в соответствии с функцией принадлежности лингвистической переменной, сопоставленной с НВР, при этом результат фаззификации соответствует максимальному значению функции. Поскольку возможны ситуации, когда соседние отсчеты НВР будут иметь одинаковое нечеткое значение a_i , то длина односвязного линейного списка r не превышает S .

Так как анализируемые последовательности термов не обязательно следуют подряд друг за другом, а могут быть разделены временными промежутками, в течение которых наблюдаются незначимые для изменения термы, то в триплет – элемент списка P введена величина временного интервала τ_i , указывающего минимальное и максимальное количество незначимых

отсчетов НВР. Этот элемент триплета может использоваться также для определения конца линейного списка. Задав список триплетов согласно (1), получим описание темпоральной закономерности генеза величины, наблюдаемой в чётком ВР и представленной в лингвистической форме. Можно утверждать, что (1) соответствует одному шаблону изменения для одного наблюдаемого параметра и одного НВР. Односвязный список триплетов P , описывающий закономерность смены термов НВР, соответствующую некоторому состоянию или являющуюся предвестником состояния объекта, будем далее называть ОЛС-паттерном. Таким образом, ОЛС-паттерну сопоставляется состояние объекта, данные о котором анализируются в НВР. Для одного НВР можно задать несколько ОЛС-паттернов, так как при его анализе возможно выявление нескольких состояний объекта наблюдения.

Обсуждение результатов. Примеры ОЛС-паттернов приведены на рис.1. Рассмотрен нечеткий ряд, состоящий из термов А, В, С, D, каждый терм соответствует моменту времени, кратному шагу дискретизации, равному трем. С использованием одинарной, двойной и штрихпунктирной линий показано вхождение терма или последовательности термов в ОЛС-паттерн. Допустимо вхождение термов в несколько паттернов одновременно. Все ОЛС-паттерны на рисунке 1 содержат по три триплета. Первый паттерн связывает в список последовательности термов А, С и D. Длина последовательности термов А и С одинакова и равна двум, длина последовательности термов D равна трем. Между последовательностью термов А и С допускается два незначимых терма. Второй паттерн связывает две последовательности термов В и терм С. Третий паттерн связывает две последовательности термов С и последовательность термов D, причем между второй последовательностью С и термами D временной промежуток, где могут быть незначимые термы, не допускается.



Рис.1. Примеры ОЛС-паттернов
Fig.1. Examples of single-linked linear lists patterns

Рассмотрим применение ОЛС-паттерна для идентификации событий в системе принятия решений информационно-измерительного комплекса, одной из целей которого является онлайн-идентификация нештатных ситуаций на контролируемых объектах [19-20]. В состав базы знаний системы принятия решений включаются описания ОЛС-паттернов, характерных для последовательностей событий НВР, каждому паттерну сопоставляется состояние контролируемого объекта. Для принятия решений в режиме онлайн требуется сопоставить реальные данные измерений с имеющимися ОЛС-паттернами.

Рассмотрим алгоритм поиска подходящего паттерна из набора ОЛС-паттернов, существующих в базе знаний. Алгоритм работы с массивом паттернов в базе при сопоставлении данных измерений ОЛС-паттерну в реальном времени приведен на рис. 2 в виде блок-схемы.

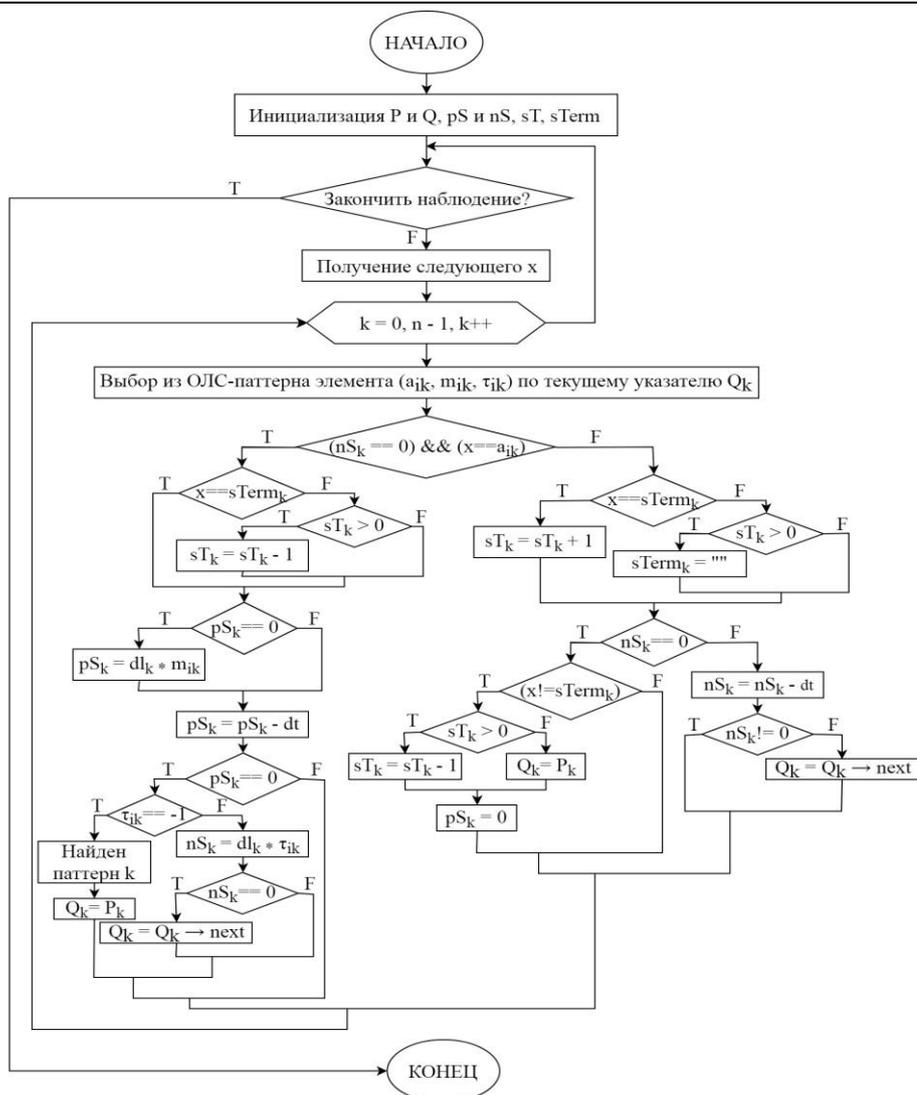


Рис.2. Алгоритм поиска ОЛС-паттерна в базе знаний

Fig.2. Algorithm for searching the single-linked linear lists pattern in the knowledge base

Он включает следующие этапы:

1. Начальное заполнение массива указателей P_k и Q_k адресами первых триплетов ОЛС-паттернов в базе, то есть адресами содержащими $(a_{0k}, m_{0k}, \tau_{0k})$, где k – номер паттерна, $k = 1, \dots, n$, n – количество рассматриваемых паттернов. Массив указателей P_k на протяжении всей работы алгоритма остается неизменным, а массив указателей Q_k изменяется, причем изменяется не число элементов массива, а сами элементы, указывающие на текущий рассматриваемый триплет ОЛС-паттернов. Начальная настройка P_k и Q_k для трех паттернов показана на рис. 3.

2. Инициализация нулевыми значениями массивов pS_k, nS_k , хранящих соответственно допустимый временной промежуток наблюдения терма для текущего триплета k -того паттерна и допустимый временной промежуток наблюдения незначимых данных, следующих за текущим триплетом. Так как нечеткий терм триплета может наблюдаться в течение промежутка времени, превышающего число шагов дискретизации по времени, указанного в первом триплете паттерна, то для каждого паттерна требуется запоминать число шагов sT_k , для которых наблюдается терм $sTerm_k$, чтобы была возможность сместить по времени момент старта наблюдений, соответствующий терму первого триплета k -того паттерна.

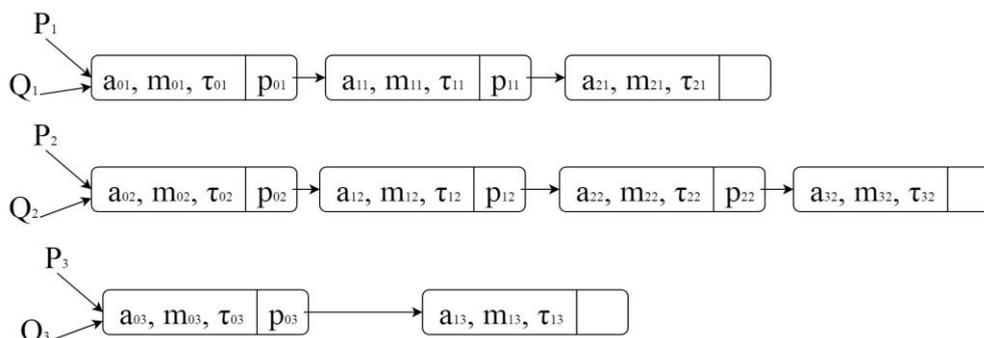


Рис.3. Инициализация указателей на ОЛС-паттерны (n=3)
Fig.3. Initializing pointers to single-linked linear lists patterns (n = 3)

Для каждого наблюдаемого значения x осуществляется циклический перебор паттернов, имеющих в базе знаний. Для текущего k -того паттерна выполнить пункт 4, после исчерпания паттернов получить следующее значение x .

3. В соответствии с указателем Q_k анализируется текущий триплет $a_i m, T_i$ k -того ОЛС-паттерна на соответствие текущему наблюдаемому значению X , а также на соответствие времени наблюдения темпоральным компонентам триплета. Если x совпадает с термом a в текущем триплете и его не нужно пропускать, то выполняются следующие действия, иначе переход к п.5:

а) корректируется рассматриваемая длина последовательности одинаковых термов для возможного сдвига времени начала наблюдения терма первого триплета паттерна;

б) если терм триплета наблюдается впервые ($pS_k = 0$), то вычисляется потенциальная длительность наблюдения этого терма $pS_k = m_{ik} \times dl_k$. Так как один терм уже анализируется, то длительность уменьшается на величину dt .

в) определяется, укладывается ли время появления x в продолжительность действия текущего триплета. Если время наблюдения терма исчерпано, то проверяется, не является ли текущий элемент последним в данном ОЛС-паттерне по значению τ_{ik} . Если это так, то k -тый паттерн обнаружен в потоке данных, и указатель Q_k на текущий триплет k -того ОЛС-паттерна сбрасывается на первый триплет этого паттерна). Иначе вычисляется продолжительность временного промежутка nS_k , в течение которого могут наблюдаться незначимые термы $nS_k = dl_k \times \tau_{ir}$. Если эта продолжительность равна нулю, то необходимо перейти к следующему триплету k -того ОЛС-паттерна, полученного по указателю $Q_k = Q_k \rightarrow next$.

4. Если наблюдаемое значение является частью длинной последовательности одинаковых термов, то увеличивается количество термов в последовательности sT_k , иначе считаем, что длинная последовательность закончилась и можно в дальнейшем оперировать запомненным количеством ее элементов для сдвига точки начала идентификации терма первого триплета паттерна. В случае, когда допустим пропуск незначимого значения, то оно пропускается с уменьшением временного промежутка пропуска незначимых значений nS_k , при исчерпании которого происходит переход к следующему триплету k -того ОЛС-паттерна ($Q_k = Q_k \rightarrow next$).

Если пропустить значение нельзя, и оно не принадлежит к длинной последовательности одинаковых термов, то либо сдвигаем время старта появления терма в последовательности одинаковых термов, либо сбрасываем указатель на текущий триплет ОЛС-паттерна на его первый триплет. После сброса снова может быть запущена проверка k -того ОЛС-паттерна на соответствие текущим наблюдаемым данным, начиная с первого триплета.

Вывод. Разработанный алгоритм позволяет выполнять анализ данных в онлайн-режиме работы и выявлять соответствие поступающей от объекта информации ОЛС-паттернам, имеющимся в базе знаний. Так как ОЛС-паттерну сопоставлено состояние объекта наблюде-

ния, то обнаружение указанного соответствия может быть использовано для оперативного принятия решений.

Для тестирования алгоритма на языке С было разработано программное обеспечение, позволяющее генерировать файлы, содержащие заданные пользователем паттерны, и выполнять их обнаружение. В результате проверки алгоритма на 500 сгенерированных файлах с 20 типами ОЛС-паттернов установлено, что все паттерны были обнаружены.

Научные результаты представляет разработанная структура хранения информации о темпоральных закономерностях в данных, основанная на односвязном линейном списке, а также алгоритм поиска закономерностей в данных наблюдений с применением набора ОЛС-паттернов. Достоинством использования данной структуры и алгоритма по сравнению с известными способами хранения и анализа темпоральных данных является сокращение объема памяти, необходимой для хранения шаблонов в базе знаний, а также возможность применения ОЛС-паттернов для принятия решений.

Библиографический список:

1. Ковалев С.М. Модели представления и поиска нечетких темпоральных знаний в базах временных рядов [Текст] / С.М. Ковалев // Труды XI Национальной конференции по искусственному интеллекту с международным участием. – Дубна, 2008.
2. Антипов С. Г. Методы диагностики динамических объектов на основе анализа временных рядов [Текст] / С. Г. Антипов, В. Н. Вагин, М. В. Фомина // ИТНОУ: информационные технологии в науке, образовании и управлении, 2017. – №2 (2). – С. 3-12.
3. Антипов С. Г. Проблема обнаружения аномалий в наборах временных рядов [Текст] / С. Г. Антипов, М. В. Фомина // Программные продукты и системы, 2012. – №2. – С. 78-82.
4. Заде Л.А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений [Текст] / Л.А. Заде – М.: Мир, 1976. – 165 с.
5. Афанасьева Т.В. Нечеткое моделирование временных рядов и анализ нечетких тенденций [Текст] / Т. В. Афанасьева, Н. Г. Ярушкина. – Ульяновск: УлГТУ, 2009. – 299 с.
6. Староверова К. Ю. Мера различия временных рядов, основанная на их характеристиках [Текст] / К. Ю. Староверова, В. М. Буре // Вестник Санкт-Петербургского университета. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления, 2017. – Т. 13. Вып. 1. – С. 51–60.
7. Song, Q. Forecasting enrollments with fuzzy time series – Part I [Text] / Q. Song, B. Chissom // Fuzzy Sets Systems, 1993. – Vol. 54. – P. 1–9.
8. Tanaka, H. Linear Regression Analysis with Fuzzy Model [Text] / H. Tanaka, S. Uejima, K. Asai // IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. – 1982. – Vol. 12. – P.903-907.
9. Kacprzyk J. Linguistic Summarization of Time Series by Using the Choquet Integral [Text] / J. Kacprzyk, A. Wilbik, S. Zadrozny // Proceedings of 12th Fuzzy Systems Association World Congress (IFSA'2007, Cancun, Mexico, June 18-21, 2007) Theoretical Advances and Applications of Fuzzy Logic. – N-Y.: Springer Verlag, 2007.
10. Pedrycz W. Granular Correlation Analysis in Data Mining [Text] / W. Pedrycz, M.H. Smith // Proceedings of IEEE International Fuzzy Systems Conference, Korea. – 1999. – Vol.III. – IN-1240.
11. Новак, В. Интегральный метод принятия решений и анализа нечетких временных рядов / Новак В., Перфильева И.В., Ярушкина Н.Г., Афанасьева Т.В. // Программные продукты и системы. – 2008. – № 4(84). – С. 65-68.
12. Bатыршин, I. Perception based time series data mining in intelligent decision making systems / Bатыршин I., Шереметов L. – ИРЕК YOLU. Collection of articles of Azerbaijan University. – 2009. - № 2. - pp.68-72.
13. Ковалев С.М. Гибридные нечетко-темпоральные модели временных рядов в задачах анализа и идентификации слабо формализованных процессов [Текст] / С.М. Ковалев // Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте. Труды IV-й Международной научно-практической конференции (Коломна, 28-30 мая 2007 г.): в 4 т. – М.: Физматлит, 2007. – Т.1. – С. 26-41.
14. Ковалев С.М. Обнаружение особых типов паттернов во временных рядах на основе гибридной стохастической модели [Текст] / С.М. Ковалев, А. В. Суханов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2014. – №4 (153). – С. 142-149.
15. Ковалев С.М. Методы многошагового предсказания аномалий в темпоральных данных [Текст] / С.М. Ковалев // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – №7 (144). – С. 85-91.
16. Ковалев С.М. Упреждающее распознавание нечетких темпоральных паттернов в потоковых данных на основе адаптивных марковских моделей [Текст] / С.М. Ковалев // XIII национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием КИИ-2012 (16-20 октября 2012 г., Белгород, Россия): труды конференции в 4 т. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2012. – Т.2. – С. 313-322.
17. Ковалев С.М. Формирование ассоциативных темпоральных правил в базах данных временных рядов на основе темпоральных сетевых моделей [Текст] / С.М. Ковалев // XII национальная конференция по искусствен-

ному интеллекту с международным участием КИИ-2010 (20-24 сентября 2010 г., Тверь, Россия): труды конференции в 4 т. – М.: Физматлит, 2010. – Т.3. – С. 321-329.

18. Сучкова Л.И. Подход к прогнозированию нештатных ситуаций в системах мониторинга с использованием паттернов поведения группы временных рядов [Текст] / Л.И. Сучкова // Ползуновский вестник. – 2013. – №2. – С. 88-92.

19. Бучацкая В. В. Обработка аномальных значений уровней временного ряда как этап комплексной оценки информации в подсистеме прогнозирования для ситуационного центра [Текст] / В. В. Бучацкая // Вестник Адыгейского государственного университета. Серия 4: Естественно-математические и технические науки, 2013. – №3 (122). – С. 105-110.

20. Вульфин А. М. Нейросетевая модель анализа технологических временных рядов в рамках методологии Data Mining [Текст] / А. М. Вульфин, А. И. Фрид // Информационно-управляющие системы, 2011. – №5. – С. 31-38.

References:

1. Kovalev S.M. Modeli predstavleniya i poiska nechetkikh temporal'nykh znaniy v bazakh vremennykh ryadov. Trudy XI Natsional'noi konferentsii po iskusstvennomu intellektu s mezhdunarodnym uchastiem. Dubna; 2008. [Kovalev S.M. Models for presenting and searching for fuzzy temporal knowledge in time series bases. Proceedings of the 11th National conference on artificial intelligence with international participation. Dubna; 2008. (in Russ.)]
2. Antipov S.G., Vagin V.N., Fomina M.V. Metody diagnostiki dinamicheskikh ob"ektov na osnove analiza vremennykh ryadov. ITNOU: informatsionnye tekhnologii v nauke, obrazovanii i upravlenii. 2017;2(2):3-12. [Antipov S.G., Vagin V.N., Fomina M.V. Methods for diagnosing dynamic objects based on time series analysis. ITNOU: informatsionnye tekhnologii v nauke, obrazovanii i upravlenii. 2017;2(2):3-12. (in Russ.)]
3. Antipov S.G., Fomina M.V. Problema obnaruzheniya anomalii v naborakh vremennykh ryadov. Programmnye produkty i sistemy. 2012;2:78-82. [Antipov S.G., Fomina M.V. The problem of detecting anomalies in sets of time series. Software and systems. 2012;2:78-82. (in Russ.)]
4. Zade L.A. Ponyatie lingvisticheskoi peremennoi i ego primenenie k prinyatiyu priblizhennykh reshenii. M.: Mir; 1976. 165 s. [Zade L.A. The concept of a linguistic variable and its application to the adoption of approximate solutions. M.: Mir; 1976. 165 p. (in Russ.)]
5. Afanas'eva T.V., Yarushkina N.G. Nechetkoe modelirovanie vremennykh ryadov i analiz nechetkikh tendentsii. Ul'yanovsk: UIGTU; 2009. 299 s. [Afanas'eva T.V., Yarushkina N.G. Fuzzy modeling of time series and analysis of fuzzy trends. Ul'yanovsk: UIGTU; 2009. 299 p. (in Russ.)]
6. Staroverova K.Yu., Bure V.M. Mera razlichiya vremennykh ryadov, osnovannaya na ikh kharakteristikakh. Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Prikladnaya matematika. Informatika. Protsessy upravleniya. 2017;13(1):51–60. [Staroverova K.Yu., Bure V.M. A measure of the difference in time series based on their characteristics. Vestnik of St. Petersburg State University. Series 10. Applied Mathematics. Computer Science. Control Processes. 2017;13(1):51–60. (in Russ.)]
7. Song Q., Chissom B. Forecasting enrollments with fuzzy time series. Part I. Fuzzy Sets Systems. 1993;54:1–9.
8. Tanaka H., Uejima S., Asai K. Linear regression analysis with fuzzy model. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. 1982;12:903-907.
9. Kacprzyk J., Wilbik A., Zadrozny S. Linguistic summarization of time series by using the Choquet integral. Proceedings of 12th Fuzzy systems association world congress (IFSA'2007, Cancun, Mexico, June 18-21, 2007). Theoretical advances and applications of fuzzy logic. N-Y.: Springer Verlag; 2007.
10. Pedrycz W., Smith M.H. Granular correlation analysis in data mining. Proceedings of IEEE International Fuzzy Systems Conference, Korea. 1999;III:IH-1240.
11. Novak V., Perfil'eva I.V., Yarushkina N.G., Afanas'eva T.V. Integral'nyi metod prinyatiya reshenii i analiza nechetkikh vremennykh ryadov. Programmnye produkty i sistemy. 2008;4(84):65-68. [Novak V., Perfil'eva I.V., Yarushkina N.G., Afanas'eva T.V. Integral method of decision-making and analysis of fuzzy time series. Software and systems. 2008;4(84):65-68. (in Russ.)]
12. Batyrshin I., Sheremetov L. Perception based time series data mining in intelligent decision making systems. IPEK YOLU. Collection of articles of Azerbaijan University. 2009;2:68-72.
13. Kovalev S.M. Gibridnye nechetko-temporal'nye modeli vremennykh ryadov v zadachakh analiza i identifikatsii slabo formalizovannykh protsessov. Trudy IV-i Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Integrirovannye modeli i myagkie vychisleniya v iskusstvennom intellekte" v 4 t. T.1. (Kolomna). M.: Fizmatlit; 2007. S. 26-41. [Kovalev S.M. Hybrid fuzzy-temporal models of time series in problems of analysis and identification of weakly formalized processes. Proceedings of the IVth International Scientific and Practical Conference "Integrated Models and Soft Computing in Artificial Intelligence" in 4 volumes. Vol.1. (Kolomna). M.: Fizmatlit; 2007. P. 26-41. (in Russ.)]
14. Kovalev S.M., Sukhanov A.V. Obnaruzhenie osobykh tipov patternov vo vremennykh ryadakh na osnove gibridnoi stokhasticheskoi modeli. Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki. 2014;4(153):142-149. [Kovalev S.M., Sukhanov A.V. Detection of special types of patterns in time series based on a hybrid stochastic model. Izvestiya SFedU. Engineering sciences. 2014;4(153):142-149. (in Russ.)]
15. Kovalev S.M. Metody mnogoshagovogo predskazaniya anomalii v temporal'nykh dannykh. Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki. 2013;7(144):85-91. [Kovalev S.M. Methods of multi-step prediction of anomalies in temporal data. Izvestiya SFedU. Engineering sciences. 2013;7(144):85-91. (in Russ.)]

16. Kovalev S.M. Uprezhdayushchee raspoznavanie nechetkikh temporal'nykh patternov v potokovykh dannykh na osnove adaptivnykh markovskikh modelei. XIII natsional'naya konferentsiya po iskusstvennomu intellektu s mezhdunarodnym uchastiem KII-2012 (16-20 oktyabrya 2012 g., Belgorod, Rossiya): trudy konferentsii v 4 t. Belgorod: Izd-vo BGTU; 2012;2:313-322. [Kovalev S.M. Predictive recognition of fuzzy temporal patterns in streaming data based on adaptive Markov models. XIII National conference on artificial intelligence with international participation KII-2012 (October 16-20, 2012, Belgorod, Russia): Proceedings of the conference in 4 volumes. Belgorod: Izd-vo BGTU; 2012;2:313-322. (in Russ.)]
17. Kovalev S.M. Formirovanie assotsiativnykh temporal'nykh pravil v bazakh dannykh vremennykh ryadov na osnove temporal'nykh setevykh modelei. XII natsional'naya konferentsiya po iskusstvennomu intellektu s mezhdunarodnym uchastiem KII-2010 (20-24 sentyabrya 2010 g., Tver', Rossiya): trudy konferentsii v 4 t. M: Fizmatlit; 2010;3:321-329. [Kovalev S.M. Formation of associative temporal rules in time series databases on the basis of temporal network models. XII National Conference on artificial intelligence with international participation KII-2010 (September 20-24, 2010, Tver, Russia): Proceedings of the conference in 4 vol. M: Fizmatlit; 2010;3:321-329. (in Russ.)]
18. Suchkova L.I. Podkhod k prognozirovaniyu neshtatnykh situatsii v sistemakh monitoringa s ispol'zovaniem patternov povedeniya gruppy vremennykh ryadov. Polzunovskii vestnik. 2013;2:88-92. [Suchkova L.I. Approach to forecasting abnormal situations in monitoring systems using the behavior patterns of a group of time series. Polzunovsky vestnik. 2013;2:88-92. (in Russ.)]
19. Buchatskaya V.V. Obrabotka anomal'nykh znachenii urovnei vremennogo ryada kak etap kompleksnoi otsenki informatsii v podsisteme prognozirovaniya dlya situatsionnogo tsentra. Vestnik Adygeiskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 4: Estestvenno-matematicheskie i tekhnicheskie nauki. 2013;3(122):105-110. [Buchatskaya V.V. Treatment of the anomalous values of the time series levels as a stage of complex information evaluation in the forecasting subsystem for the situational center. The Bulletin of the Adyge State University, the series "Natural-Mathematical and Technical Sciences". 2013;3(122):105-110. (in Russ.)]
20. Vul'fin A.M., Frid A.I. Neurosetevaya model' analiza tekhnologicheskikh vremennykh ryadov v ramkakh metodologii Data Mining. Informatsionno-upravlyayushchie sistemy. 2011;5:31-38. [Vul'fin A.M., Frid A.I. Neural network model of the analysis of technological time series within the framework of the Data Mining methodology. Information and Control Systems. 2011;5:31-38. (in Russ.)]

Сведения об авторах:

Дульцев Денис Вячеславович – аспирант, кафедра информатики, вычислительной техники и информационной безопасности.

Сучкова Лариса Иннокентьевна – доктор технических наук, профессор, кафедра информатики, вычислительной техники и информационной безопасности.

Information about the authors.

Denis V. Dultsev –Graduate Student, Department of Computer Science, Computer Engineering and Information Security.

Larisa I.Suchkova – Dr.Sci. (Technical), Prof., Department of Computer Science, Computer Engineering and Information Security.

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 23.03.2018.

Принята в печать 28.04.2018.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 23.03.2018.

Accepted for publication 28.04.2018.

Для цитирования: Качаева Г.И., Мустафаев А.Г. Использование нейросетевых методов для автоматического анализа электрокардиограмм при диагностике заболеваний сердечно-сосудистой системы. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2018; 45 (2): 114-124. DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-2-114-124

For citation: Kachaeva G.I., Mustafayev A.G. The use of neural networks for the automatic analysis of electrocardiograms in diagnosis of cardiovascular diseases. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2018; 45 (2): 114-124. (in Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-2-114-124

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 004.032.26

DOI: 10.21822/2073-6185-2018-45-2-114-124

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ЭЛЕКТРОКАРДИОГРАММ ПРИ ДИАГНОСТИКЕ ЗАБОЛЕВАНИЙ СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТОЙ СИСТЕМЫ

Качаева Г.И.,² Мустафаев А.Г.¹

¹⁻²Дагестанский государственный технический университет,

¹⁻²367026, г. Махачкала, пр. Имама Шамиля, 70, Россия,

¹e-mail: arslan_mustafayev@mail.ru, ²e-mail: providetc@mail.ru

Резюме. Цель. Цель работы состоит в использовании нейронных сетей для обнаружения характерных ЭКГ сигналов, определяющих аномалии сердечного ритма и выявлении соответствующего заболевания сердца. Одним из важнейших факторов для своевременного оказания медицинской помощи является быстрое и точное получение информации о состоянии здоровья пациента. Своевременность постановки диагноза нередко является основным фактором, определяющим прогноз больного. В последние годы в кардиологии значительно увеличилась точность диагностики благодаря широкому применению, как инструментальных, так и лабораторных методов исследований. Тем не менее, процент диагностических ошибок в кардиологии достаточно высок. Электрокардиография (ЭКГ) представляет собой неинвазивный процесс интерпретации электрической активности сердца, позволяющий оценивать скорость и регулярность сердечных сокращений. Эти данные используются для определения поврежденных и патологий сердца. Автоматический анализ ЭКГ является непростой теоретической и практической задачей. **Метод.** При проектировании был использован пакет Neural Network Toolbox из MATLAB 8.6 (R2015b) моделирующий аппарат искусственных нейронных сетей. При обучении нейронной сети использовался алгоритм обратного распространения ошибки. Эффективность разработанной нейросетевой модели для анализа ЭКГ была исследована с использованием базы данных аритмий MIT-BIH. **Результат.** Точность обнаружения и извлечения компонентов сигнала ЭКГ показывает, что разработанная нейросетевая модель может быть использована для выявления заболеваний сердца у пациентов. Чувствительность модели составила 71%, специфичность 89%. Развитие существующих и разработка новых методов обработки электрокардиографических данных позволяют решить проблему своевременной диагностики и профилактики сердечно-сосудистых заболеваний на ранних этапах их выявления. **Вывод.** Точность обнаружения и извлечения компонентов сигнала ЭКГ, показывает, что разработанная нейросетевая модель может быть использована для выявления заболеваний сердца у пациентов.

Ключевые слова: электрокардиограмма, искусственная нейронная сеть, компьютерная диагностика, обратное распространение ошибки, обучение с учителем, QRS комплекс

TECHNICAL SCIENCE
COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT

**THE USE OF NEURAL NETWORKS FOR THE AUTOMATIC ANALYSIS OF
ELECTROCARDIOGRAMS IN DIAGNOSIS OF CARDIOVASCULAR DISEASES**

Gyulkhanum I.Kachayeva², Arslan G.Mustafayev¹

¹⁻²Daghestan State Technical University,

¹⁻²70 I. Shamilya Ave., Makhachkala 367026, Russia,

¹e-mail: arslan_ mustafayev @ mail.ru, ²e-mail: providetc@mail.ru

Abstract Objectives The aim of the work is to use neural networks to detect characteristic ECG signals that determine heart rhythm abnormalities and detect the corresponding heart disease. One of the most important factors for the timely provision of medical care is the rapid and accurate obtaining of information about the patient's state of health. The timeliness of diagnosis is often the main factor determining the patient's prognosis. While the accuracy of cardiological diagnosis has significantly increased in recent years due to the wide application of both instrumental and laboratory research methods, the percentage of diagnostic errors in cardiology remains high. Electrocardiography (ECG) consists in a non-invasive process of interpreting the electrical activity of the heart, allowing the speed and regularity of the heartbeat to be assessed. These data are then used to determine any heart defects or pathologies. However, automatic ECG analysis remains a challenging theoretical and practical task. **Methods** A MATLAB 8.6 (R2015b) Neural Network Toolbox was used to simulate artificial neural networks during the design. A backpropagation algorithm was used for training the neural network. The efficiency of the developed neural network model for ECG analysis was investigated using the MIT-BIH arrhythmia database. **Results** The accuracy of detection and extraction of the components of the ECG signal shows that the developed neural network model can be successfully used to detect heart diseases among patients. The sensitivity of the model was 71%, with a specificity of 89%. The elaboration of existing and development of new methods for processing electrocardiographic data allow the problem of timely diagnosis and prevention of cardiovascular diseases to be solved at early stages of their detection. **Conclusion** The accuracy of detection and extraction of the ECG signal components shows that the developed neural network model can be used to detect heart diseases among patients.

Keywords: electrocardiogram, artificial neural network, computer diagnostics, backpropagation, training with the teacher, QRS complex

Введение. По данным Всемирной организации здравоохранения [1] заболевания сердечно-сосудистой системы уносят свыше 17 миллионов жизней в год. Сердечная аритмия и нарушение сердечного ритма могут свидетельствовать о возможности серьезных сердечно-сосудистых заболеваний, инсульта или внезапной сердечной смерти. Ранняя диагностика нарушений сердечного ритма позволяет выбрать соответствующее медикаментозное лечение.

Большинство клинических исследований сердечно-сосудистой системы основаны на анализе электрокардиограмм (ЭКГ) и изучении ряда других регистрируемых сигналов, иллюстрирующих биоэлектрическую активность сердца. К числу несомненных преимуществ такого подхода можно отнести относительную простоту, доступность, неинвазивность и достаточно высокую информативность. ЭКГ – функциональный метод исследования, суть которого заключается в определении состояния сердца и сердечно-сосудистой системы по изменениям в их электрической активности. Этот метод исследования на сегодняшний день является самым распространенным и проводится практически во всех медицинских учреждениях.

Наибольший интерес для практического здравоохранения представляют системы для диагностики заболеваний. Работы в данной области ведутся российскими и зарубежными исследователями [2-7].

Задачи диагностики и прогнозирования, встречающиеся в медицинской практике как,

правило не учитывают все реально имеющиеся условия, от которых зависит результат, а только выделяют некоторый набор наиболее важных условий.

Постановка задачи. Целью данной работы является разработка нейросетевой системы для автоматического анализа электрокардиограмм при диагностике заболеваний сердечно-сосудистой системы.

Методы исследования. Электрокардиография до сих пор остается наиболее распространенным методом функциональной диагностики в кардиологии. В то же время, существующие компьютерные средства анализа и интерпретации ЭКГ все еще не обеспечивают требуемую достоверность результатов диагностики. Изображение эталонной ЭКГ и обозначение ее элементов показано на рис. 1.

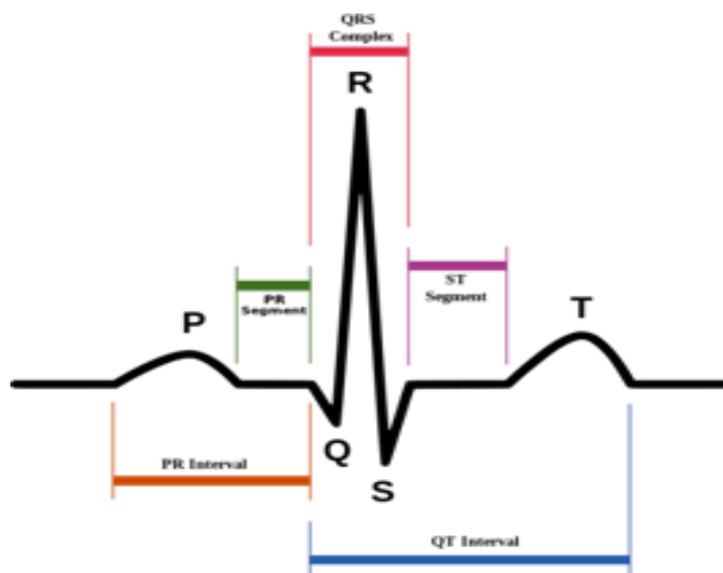


Рис.1. Эталонная электрокардиограмма

Fig.1. Reference electrocardiogram

На реальных ЭКГ нет четких границ между информативными фрагментами, что затрудняет их автоматическое распознавание. Реальная ЭКГ обычно наблюдается в условиях разного рода возмущений, которые далеко не всегда могут быть сведены лишь к аддитивной помехе. При повышении соотношения сигнал-шум, происходит «размытие» информативных фрагментов из-за неравномерных изменений их продолжительности от цикла к циклу что приводит к ошибкам в измерении диагностических признаков, сосредоточенных на этих фрагментах [8].

Автоматический анализ ЭКГ является непростой теоретической и практической задачей. Физиологическое происхождение сигнала ЭКГ, обуславливает его недетерминированность, разнообразие, изменчивость, нестационарность и подверженность многочисленным видам помех. Увеличение эффективности методов автоматического анализа ЭКГ сдерживается ограничениями, связанными с вычислительной мощностью используемых процессоров [9]. Это в наибольшей степени относится к аппаратуре непрерывного наблюдения, так как обработка сигналов в ней должна выполняться в реальном масштабе времени. Производительность вычислительных средств постоянно повышается, поэтому становятся востребованными такие методы обработки и анализа сигналов, применение которых в системах реального времени ранее представлялось сложно реализуемым.

Нейронная сеть – математическая парадигма моделирования поведения биологических нейронных систем. Искусственная нейронная сеть состоит из нескольких простых нелинейных элементов – нейронов, соединенных между собой взвешенными связями – синапсами, формирующими сеть.

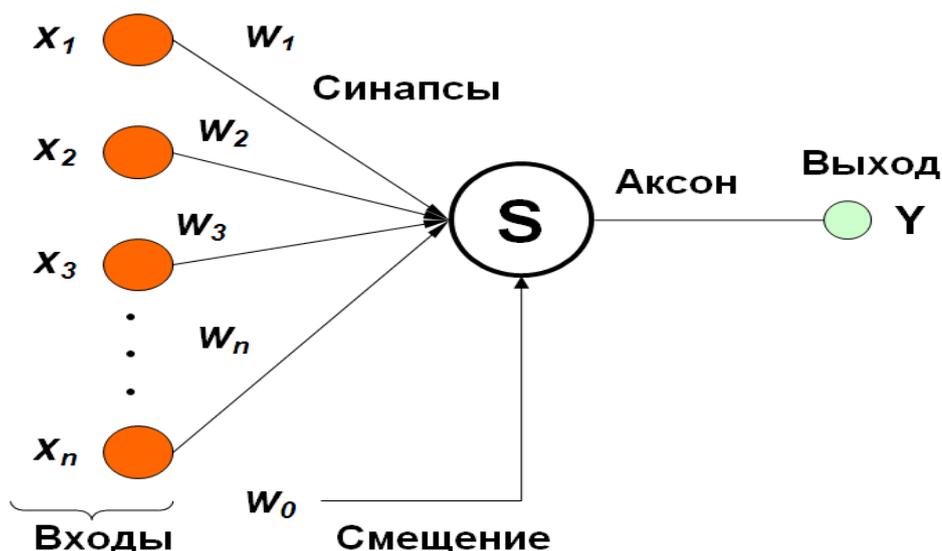


Рис. 2. Модель искусственного нейрона [10]
Fig. 2. Model of an artificial neuron [10]

Искусственный нейрон является структурной единицей искусственной нейронной сети и представляет собой аналог биологического нейрона (рис. 2).

Обсуждение результатов. С математической точки зрения искусственный нейрон – это сумматор входных сигналов, применяющий к полученной сумме простую, в общем случае, нелинейную функцию, непрерывную на всей области определения. Полученный результат посылается на единственный выход.

Искусственные нейроны могут объединяются между собой определенным образом, образуя искусственную нейронную сеть. Каждый нейрон характеризуется своим текущим состоянием по аналогии с нервными клетками головного мозга, которые могут быть возбуждены или заторможены. Нейрон обладает группой синапсов – однонаправленных входных связей, соединенных с выходами других нейронов, а также имеет аксон – выходную связь данного нейрона, с которой сигнал поступает на синапсы следующих нейронов.

Каждый синапс характеризуется величиной синаптической связи (весом связи) W_i . Текущее состояние нейрона определяется, как взвешенная сумма его входов:

$$S = \sum_{i=1}^n x_i W_i + W_0, \quad (1)$$

где: w_0 — коэффициент смещения нейрона (вес единичного входа)

Выход нейрона есть функция его состояния:

$$Y = F(S).$$

Нелинейная функция F называется активационной и может иметь различный вид. Если нейроны сгруппированы в слои и их синапсы связаны только с нейронами в соседних слоях, то подобная структура является многослойным персептроном. Модель многослойного персептрона является наиболее популярной и широко изученной. Многослойный персептрон состоит из одного входного и одного выходного слоя, с одним или несколькими скрытыми слоями.

При обнаружении и обработке ЭКГ сигнала, в основном используются многослойные персептроны и радиально-базисные нейронные сети [11-12].

При формировании исходных данных был использован архив, содержащий структурированный массив оцифрованных записей реальных физиологических сигналов и связанных с ними данных для применения биомедицинским сообществом в исследованиях [13]. Данные записи были получены Холтеровским мониторингом в условиях стационара и независимо проанализированы двумя практикующими врачами. Пример записи показан на рис. 3 (фрагмент ЭКГ этой записи показан на рис. 4).

Record 109 (MLII, V1; male, age 64)

Medications: Quinidine

Beats	Before 5:00	After 5:00	Total
Left BBB	425	2067	2492
PVC	6	32	38
Fusion PVC	2	-	2
Total	433	2099	2532

Ventricular ectopy

- 40 isolated beats

Rhythm	Rate	Episodes	Duration
Normal sinus rhythm	77-101	1	30:06

Signal quality	Episodes	Duration
Both clean	2	29:52
Lower noisy	1	0:14

Notes:
There is first degree AV block. The PVCs are multiform.

Points of interest:

- 0:13 Fusion PVC
- 1:28 PVC
- 3:36 Normal sinus rhythm with left bundle branch block
- 4:46 PVC
- 5:27 Noise
- 14:01 PVC
- 17:13 PVC
- 19:21 PVC
- 26:09 Noise
- 28:03 PVC
- 28:28 Normal sinus rhythm with left bundle branch block
- 29:10 PVC

Рис. 3. Образец записи №109 из базы MIT-BIH
 Fig. 3. Sample Record № 109 from the MIT-BIH database

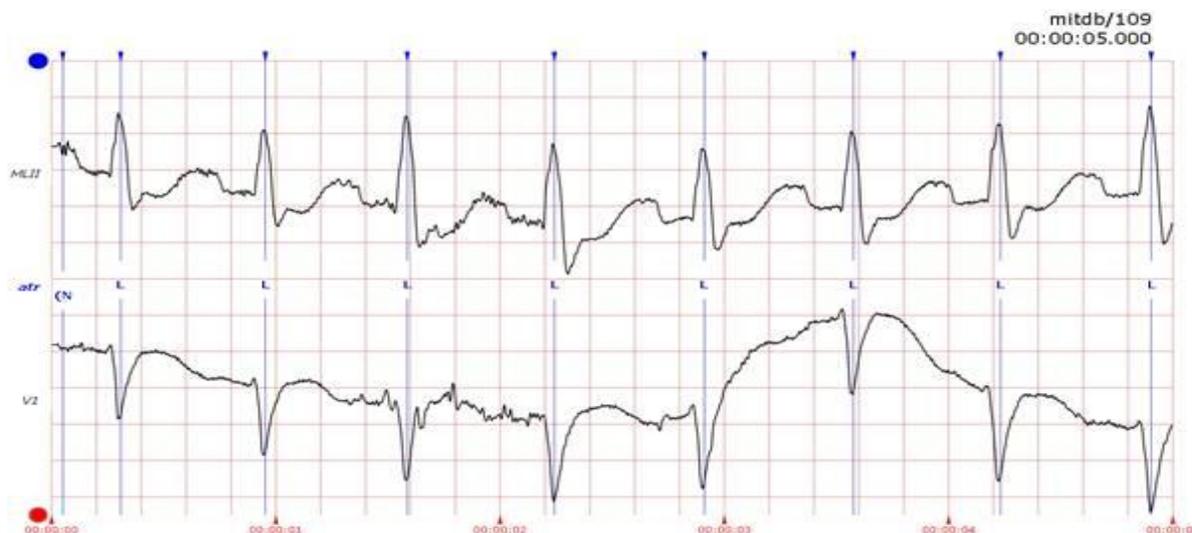


Рис.4. Фрагмент ЭКГ записи №109
 Fig.4. Fragment of ECG recording number 109

При анализе ЭКГ учитывают следующие нормальные значения интервалов и комплексов [14]:

1. Ширина комплекса QRS в интервале 60- 100 мс.
2. Длительность интервала QT составляет 390- 450 мс.
3. Длительность интервалов R-R одинакова или имеет разброс до 10%.
4. Длительность интервала PQ составляет 120- 200 мс.
5. Амплитуда зубца S не более 20 мм.
6. Зубец T направлен вверх в отведении I и II, но в aVR отведении – всегда будет отрицательный.
7. Зубец P по амплитуде не более 2,5 мм, а по длительности 0,1 сек.

8. Зубец Q не шире 20- 40 мс и не глубже 1/3 зубца R.

Вопрос нахождения оптимального числа нейронов скрытого слоя не имеет однозначного решения по причине отсутствия устоявшейся методики [15-17].

Например, в [18] рекомендуется число нейронов скрытого слоя определять эмпирическим путем, но в большинстве случаев используется правило, $N_{\text{скр}} \leq N_{\text{вх}} + N_{\text{вых}}$, где $N_{\text{скр}}$, $N_{\text{вх}}$, $N_{\text{вых}}$ – число нейронов соответственно в скрытом, входном и выходном слое.

В [19] предлагается правило геометрической пирамиды. Число нейронов скрытого слоя в трехслойном персептроне вычисляется из выражения $N_{\text{скр}} = \sqrt{N_{\text{вх}}N_{\text{вых}}}$, где $N_{\text{скр}}$, $N_{\text{вх}}$, $N_{\text{вых}}$ – число нейронов в скрытом, входном и выходном слое.

Выбор правильного количества нейронов в скрытых слоях является очень важным. Недостаточное число нейронов не позволит сети обучиться. Большое число нейронов приведет к увеличению времени обучения сети, до неприемлемого значения, и к эффекту переобучения сети – сеть будет прекрасно работать на обучающей выборке, и очень плохо на входных примерах, не входящих в нее. Это происходит из-за того, что сеть будет обладать избыточными способностями к обучению и наряду со значительными для данной задачи факторами будет учитывать черты, характерные лишь для данной обучающей выборки.

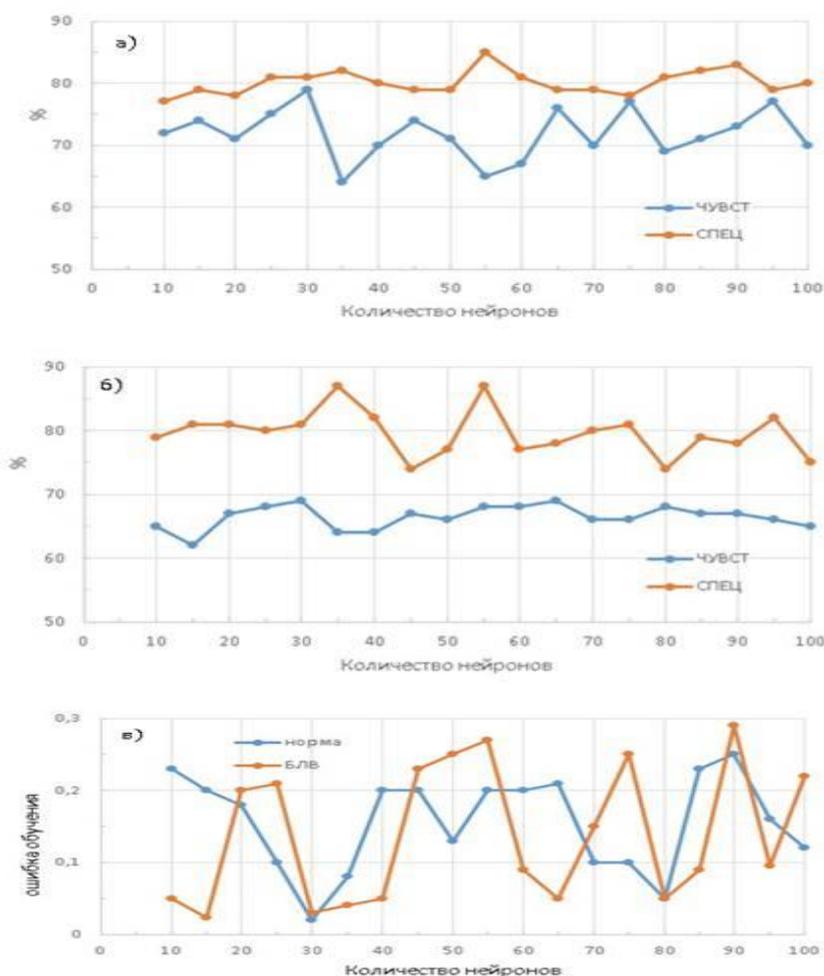


Рис. 5. Значения чувствительности, специфичности для выхода «Норма» (а) и выхода «БЛВ» (б) и ошибки обучения (в)
Fig. 5. The values of sensitivity, specificity for the output «Norma» (a) and the output «BLV» (b) and learning errors (c)

По этой причине в работе использован метод, в основе которого лежит учет критериев оценки эффективности работы искусственной нейронной сети: чувствительность, специфичность и ошибка обучения.

От параметров чувствительности и специфичности алгоритма зависит достоверность классификации ритмов сердца. Чувствительность характеризует достоверность определения аномальных эпизодов, а специфичность характеризует достоверность определения эпизодов нормального сердечного ритма.

Для нахождения оптимального числа нейронов скрытого слоя нейронной сети со структурой многослойного персептрона, необходимо произвести исследование показателей чувствительности и специфичности всех выходов сети.

Показатели чувствительности и специфичности в идеальном случае должны стремиться к 100%. В реальных условиях при решении задач диагностики система должна выбрать один из нескольких вариантов диагноза. При этом по всем вариантам диагноза желательно иметь значения критериев чувствительности и специфичности системы по всем вариантам диагноза равномерно распределенными, но не ниже порогового значения, при котором результат не может считаться достоверным [19].

На рис. 5 представлены значения чувствительности и специфичности, показанные нейронной сетью, при различном числе нейронов в скрытом для двух вариантов выхода.

Для обучения нейронной сети был подготовлен набор данных из 458 эпизодов ЭКГ (обучающая выборка 50%, валидационная выборка 30%, и тестовая выборка 20%).

Разработанная нейронная сеть содержит 9 входных нейронов, по числу учитываемых параметров, скрытый слой с 30 нейронами, и 5 нейронов в выходном слое (рис. 6).

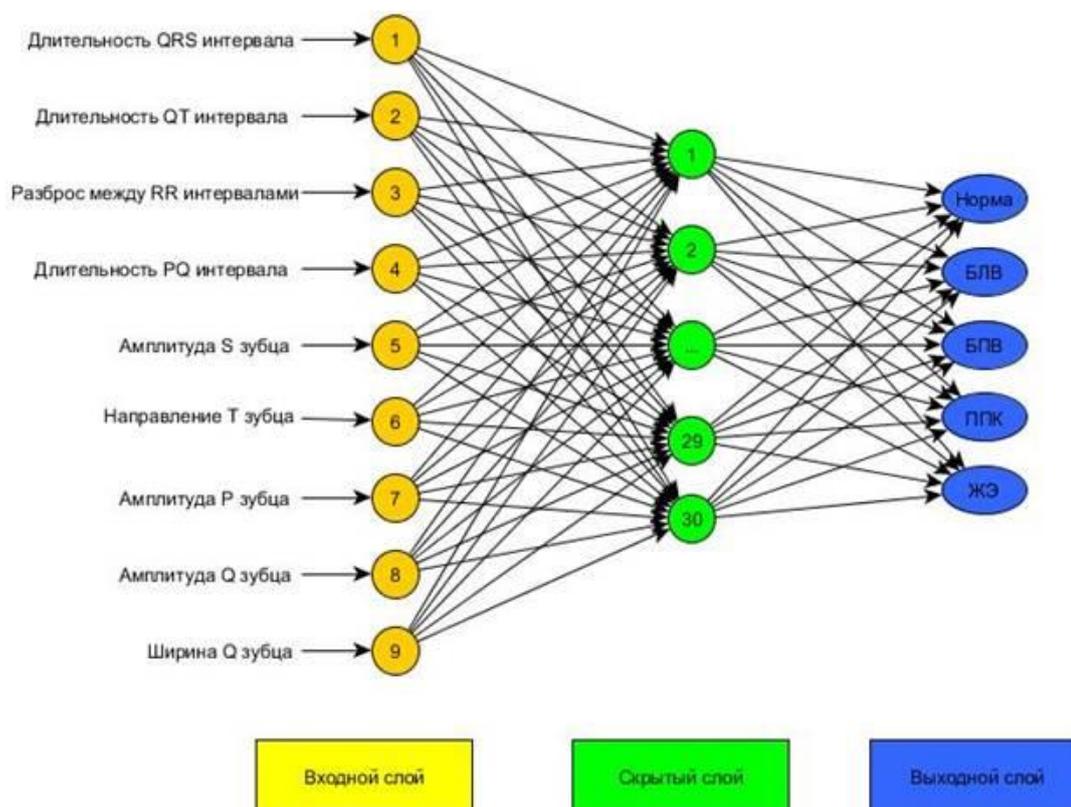


Рис. 6. Архитектура нейронной сети
Fig. 6. Neural Network Architecture

Подготовленные входные данные подаются на входной слой нейронной сети, выходной слой которой диагностирует состояние пациента как нормальное (здоров), блокада левой ножки пучка Гиса (БЛВ), блокада правой ножки пучка Гиса (БПВ), преждевременный предсердный комплекс (ППК), желудочковая экстрасистола (ЖЭ).

В качестве активационной функции в выходном слое использовалась сигмоидальная логистическая функция (рис. 7):

$$F(Y) = \frac{1}{1 + \alpha Y}, \quad (2)$$

где: α – параметр наклона логистической функции.

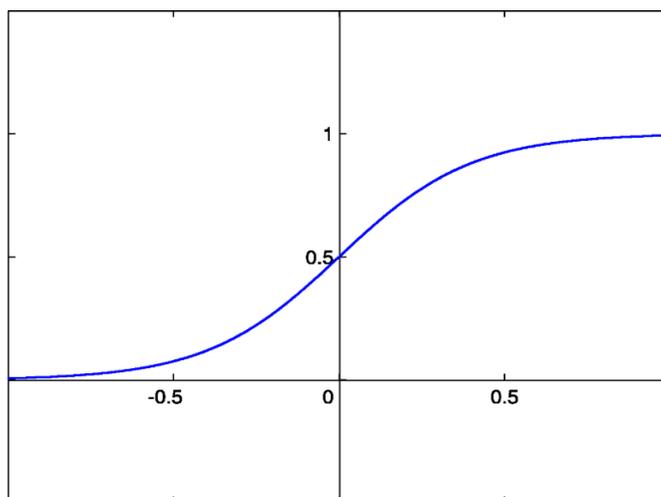


Рис.7. Функция активации нейрона
Fig.7. Neuron activation function

Для обучения искусственной нейронной сети был использован алгоритм обратного распространения ошибки [21].

Алгоритм обратного распространения ошибки (рис. 8) предполагает вычисление ошибки, как выходного слоя, так и каждого нейрона обучаемой сети, а также коррекцию весов нейронов в соответствии с их текущими значениями.

На первом шаге данного алгоритма веса всех межнейронных связей инициализируются небольшими случайными значениями (от 0 до 1).

После инициализации весов в процессе обучения нейронной сети выполняются следующие шаги: прямое распространение сигнала; вычисление ошибки нейронов последнего слоя; обратное распространение ошибки.

Прямое распространение сигнала производится послойно, начиная со входного слоя, при этом рассчитывается сумма входных сигналов для каждого нейрона, и при помощи функции активации генерируется отклик нейрона, который распространяется в следующий слой с учетом веса межнейронной связи.

В результате выполнения данного этапа мы получаем вектор выходных значений нейронной сети. Следующий этап обучения – вычисление ошибки нейронной сети как разницы между ожидаемым и действительным выходными значениями.

Полученные значения ошибок распространяются от последнего, выходного слоя нейронной сети, к первому. При этом вычисляются величины коррекции весов нейронов в зависимости от текущего значения веса связи, скорости обучения и ошибки, внесенной данным нейроном.

После завершения данного этапа шаги описанного алгоритма повторяются до тех пор, пока ошибка выходного слоя не достигнет требуемого значения.

При определении выходного результата учитывается максимальное значение одного из выходных нейронов (этот сигнал интерпретируется как единица, а остальные как 0). Например, один из выходных нейронов имеет значение 0,87, если это максимальное значение в выходном слое нейронов, то оно будет интерпретировано как «1», т.е. значения других нейронов выходного слоя интерпретируются как «0».

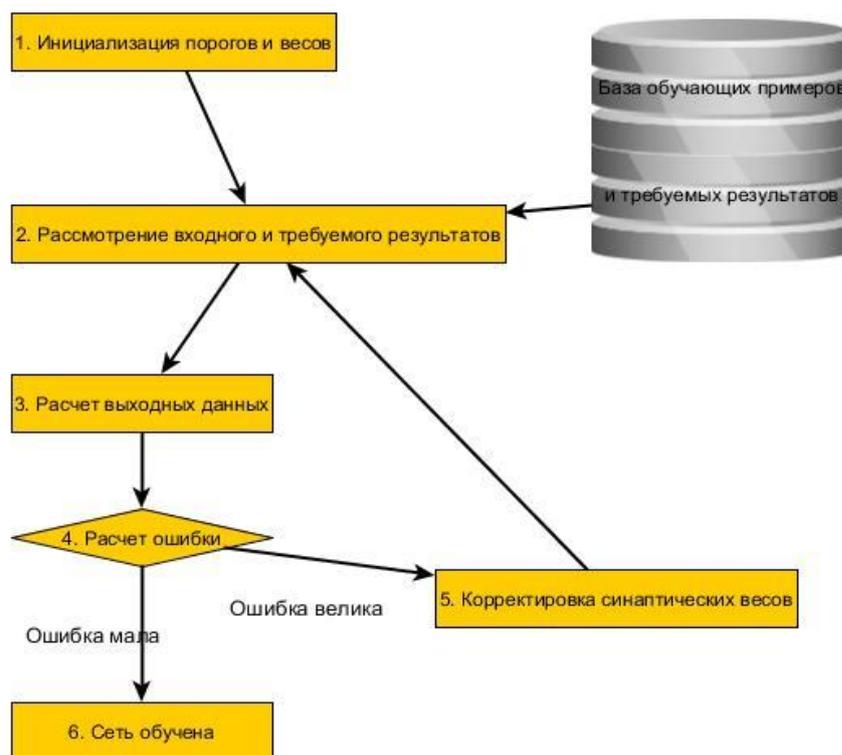


Рис. 8. Схема работы алгоритма обратного распространения ошибки

Fig. 8. The scheme of the algorithm back propagation of error

Вывод. Специфичность предложенной нейросетевой системы, проверена исследованием на контрольной группе без сердечно-сосудистых заболеваний, составила 81%. Чувствительность разработанной системы проверялась на контрольной группе с сердечно-сосудистыми заболеваниями, составила 79%. Точность обнаружения и извлечения компонентов сигнала ЭКГ, показывает, что разработанная нейросетевая модель может быть использована для выявления заболеваний сердца у пациентов.

Библиографический список:

1. Всемирная организация здравоохранения [Электронный ресурс]: Сердечно-сосудистые заболевания. URL: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs317/ru> (дата обращения: 25.10.2017).
2. Lee J.W., Lee G. Design of an Adaptive Filter with a Dynamic Structure for ECG Signal // Processing. International Journal of Control, Automation, and Systems, 2005, Vol. 3, No. 1, pp. 137-142.
3. Ince T., Kiranyaz S., Gabbouj M. A Generic and Robust System for Automated Patient-Specific Classification of ECG Signals // IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2009, Vol. 56, pp. 1415-1426.
4. Lin C.H., Du Y.C., Chen T. Adaptive wavelet network for multiple cardiac arrhythmias recognition // Expert Systems with Applications, 2008. No. 34, pp. 2601-2611.
5. Мустафаев А.Г. Нейросетевая модель прогнозирования уровня глюкозы в крови у больных сахарным диабетом // Кибернетика и программирование. 2016. № 3. С. 1-5.
6. Мустафаев А.Г. Применение искусственных нейронных сетей для ранней диагностики заболевания сахарным диабетом // Кибернетика и программирование. 2016. - № 2. - С.1-7.
7. Никитин В.М., Ломакин В.В., Анохин Д.А., Кайдалова И.К., Иванов И.И. Информационная система поддержки принятия решений слабоструктурированных задач в кардиологии // Научные ведомости БелГУ серия «История. Политология. Экономика. Информатика». 2010. № 19(90). Вып. 16/1. с. 112–119.
8. Файнзильберг Л.С., Лебедушко Т.Ю. Исследование диагностической ценности фазовых портретов ЭКГ по данным специализированных баз // Кибернетика и вычислительная техника. 2012. Вып. 169. С. 34-50.

9. Калининченко А.Н. Оценка разделяющей способности методов классификации форм ЭКГ // Известия СПбГЭТУ "ЛЭТИ". Сер. Биотехнические системы в медицине и экологии. 2006. Вып. 1. С. 21-30.
10. Портал искусственного интеллекта [Электронный ресурс]: Искусственный нейрон. Структура искусственного нейрона. URL: <http://neuronus.com/theory/151-iskusstvennyj-nejron.html> дата обращения: 25.12.2017).
11. Guangying Y., Yue C. The Study of Electrocardiograph Based on Radial Basis Function Neural Network // Intelligent Information Technology and Security Informatics (IITSI), 2010, pp.143-145.
12. Gao D., Madden M. Bayesian ANN Classifier for ECG Arrhythmias Diagnostic System // Proceeding of IEEE International Joint Conference on Neural Network, 2003, pp. 2454-2459.
13. База данных аритмий Массачусетского технологического института [Электронный ресурс]: Описание. URL: <http://ecg.mit.edu/> (дата обращения: 20.09.2017).
14. Габриэль Хан М. Быстрый анализ ЭКГ // М.: Бином, 2009. - 408 с.
15. Trenn S. Multilayer perceptrons: approximation order and necessary number of hidden units // IEEE Transactions on Neural Networks, vol. 19, no. 5, pp. 836–844, 2008.
16. Xu S., Chen L. A novel approach for determining the optimal number of hidden layer neurons for FNN's and its application in data mining // Proceedings of the 5th International Conference on Information Technology and Applications (ICITA '08), 2008, pp. 683–686.
17. Sun J. Learning algorithm and hidden node selection scheme for local coupled feedforward neural network classifier // Neurocomputing, vol. 79, 2012, pp. 158–163.
18. Назаров А.В., Лоскутов А.И. Нейросетевые алгоритмы прогнозирования и оптимизации систем // – СПб: Наука и техника, 2003. – 380 с.
19. Masters T. Practical Neural Network Recipes in C++ // Academic Press, 1993. -504 p.
20. Салех М.А., Исаков Р.В. Оценка эффективности применения искусственных нейронных сетей для анализа сегментированных электрокардиокомплексов // Биомедицинская радиоэлектроника. № 6, 2012, с.21-27.
21. Галушкин А.И. Теория нейронных сетей. - М.: ИПРЖР, 2000. - 348 с.

References:

1. Vsemirnaya organizatsiya zdravookhraneniya [Elektronnyi resurs]: Serdechno-sosudistye zabolevaniya. URL: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs317/ru> (data obrashcheniya: 25.10.2017). [World Health Organization [Electronic resource]: Cardiovascular diseases. URL: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs317/ru> (access date: 25.10.2017). (in Russ.)]
2. Lee J.W., Lee G. Design of an adaptive filter with a dynamic structure for ECG signal. Processing. International Journal of Control, Automation, and Systems. 2005;3(1):137-142.
3. Ince T., Kiranyaz S., Gabbouj M. A generic and robust system for automated patient-specific classification of ECG signals. IEEE Transactions on Biomedical Engineering. 2009;56:1415-1426.
4. Lin C.H., Du Y.C., Chen T. Adaptive wavelet network for multiple cardiac arrhythmias recognition. Expert Systems with Applications. 2008;34:2601-2611.
5. Mustafaev A.G. Neirosetevaya model' prognozirovaniya urovnya glyukozy v krovi u bol'nykh sakharnym diabetom. Kibernetika i programmirovaniye. 2016;3:1-5. [Mustafaev A.G. Neural network model for predicting the level of glucose in the blood in patients with diabetes mellitus. Cybernetics and programming. 2016;3:1-5. (in Russ.)]
6. Mustafaev A.G. Primeneniye iskusstvennykh neironnykh setei dlya rannei diagnostiki zabolevaniya sakharnym diabetom. Kibernetika i programmirovaniye. 2016;2:1-7. [Mustafaev A.G. The use of artificial neural networks for early diagnosis of diabetes mellitus. Cybernetics and programming. 2016;2:1-7. (in Russ.)]
7. Nikitin V.M., Lomakin V.V., Anokhin D.A., Kaidalova I.K., Ivanov I.I. Informatsionnaya sistema podderzhki prinyatiya reshenii slabostrukturirovannykh zadach v kardiologii. Nauchnye vedomosti BelGU. Seriya "Istoriya. Politologiya. Ekonomika. Informatika". 2010;19(90):112–119. [Nikitin V.M., Lomakin V.V., Anokhin D.A., Kaidalova I.K., Ivanov I.I. Information system for decision support of weakly structured tasks in cardiology. Belgorod State University Scientific bulletin. Series "History. Political science. Economics. Information technologies". 2010;19(90):112–119. (in Russ.)]
8. Fainzil'berg L.S., Lebedushko T.Yu. Issledovaniye diagnosticheskoi tsennosti fazovykh portretov EKG po dannym spetsializirovannykh baz. Kibernetika i vychislitel'naya tekhnika. 2012;169:34-50.

- [Fainzil'berg L.S., Lebedushko T.Yu. Study of the diagnostic value of ECG phase portraits according to the data of specialised bases. *Cybernetics and Computer Engineering*. 2012;169:34-50. (in Russ.)]
9. Kalinichenko A.N. Otsenka razdelyayushchei sposobnosti metodov klassifikatsii form EKG. *Izvestiya SPbGETU "LETI"*. Ser. Biotekhnicheskie sistemy v meditsine i ekologii. 2006;1:21-30. [Kalinichenko A.N. Evaluation of the separating ability of ECG form classification methods. *Izvestiya SPbGETU "LETI"*. Ser. Biotekhnicheskie sistemy v meditsine i ekologii. 2006;1:21-30. (in Russ.)]
 10. Portal iskusstvennogo intellekta [Elektronnyi resurs]: Iskusstvennyi neiron. Struktura iskusstvennogo neirona. URL: <http://neuronus.com/theory/151-iskusstvennyj-nejron.html>. (data obrashcheniya: 25.12.2017). [Portal of artificial intelligence [Electronic resource]: Artificial neuron. Structure of an artificial neuron. URL: <http://neuronus.com/theory/151-iskusstvennyj-nejron.html>. (access date: 25.12.2017). (in Russ.)]
 11. Guangying Y., Yue C. The study of electrocardiograph based on radial basis function neural network. *Intelligent Information Technology and Security Informatics (IITSI)*. 2010:143-145.
 12. Gao D., Madden M. Bayesian ANN classifier for ECG arrhythmias diagnostic system. *Proceeding of IEEE International Joint Conference on Neural Network*. 2003. P. 2454-2459.
 13. Baza dannykh aritmii Massachusetskogo tekhnologicheskogo instituta [Elektronnyi resurs]: Opisanie. URL: <http://ecg.mit.edu/> (data obrashcheniya: 20.09.2017). [The database of arrhythmias of the Massachusetts Institute of Technology [Electronic resource]: Description. URL: <http://ecg.mit.edu/> (access date: 20.09.2017). (in Russ.)]
 14. Gabriel' Khan M. Bystryi analiz EKG. M.: Binom; 2009. 408 s. [Gabriel' Khan M. Quick analysis of the ECG. M.: Binom; 2009. 408 p. (in Russ.)]
 15. Trenn S. Multilayer perceptrons: approximation order and necessary number of hidden units. *IEEE Transactions on Neural Networks*. 2008;19(5):836–844, 2008.
 16. Xu S., Chen L. A novel approach for determining the optimal number of hidden layer neurons for FNN's and its application in data mining. *Proceedings of the 5th International Conference on Information Technology and Applications (ICITA '08)*. 2008. P. 683–686.
 17. Sun J. Learning algorithm and hidden node selection scheme for local coupled feedforward neural network classifier. *Neurocomputing*. 2012;79:158–163.
 18. Nazarov A.V., Loskutov A.I. Neurosetevye algoritmy prognozirovaniya i optimizatsii sistem. SPb: Nauka i tekhnika; 2003. 380 s. [Nazarov A.V., Loskutov A.I. Neural network algorithms for forecasting and optimisation of systems. SPb: Nauka i tekhnika; 2003. 380 p. (in Russ.)]
 19. Masters T. *Practical Neural Network Recipes in C++*. Academic Press; 1993. 504 p.
 20. Salekh M.A., Isakov R.V. Otsenka effektivnosti primeneniya iskusstvennykh neironnykh setei dlya analiza segmentirovannykh elektrokardiokompleksov. *Biomeditsinskaya radioelektronika*. 2012;6:21-27. [Salekh M.A., Isakov R.V. Effectiveness evaluation of the application of artificial neural networks for the analysis of segmented electrocardiocomplexes. *Biomedical radioelectronics*. 2012;6:21-27. (in Russ.)]
 21. Galushkin A.I. Teoriya neironnykh setei. M.: IPRZhR; 2000. 348 s. [Galushkin A.I. The theory of neural networks. M.: IPRZhR; 2000. 348 p. (in Russ.)]

Сведения об авторах:

Качаева Гюльханум Ибадулаховна – кандидат экономических наук, заведующая кафедрой информационных технологий и информационной безопасности.

Мустафаев Арслан Гасанович – доктор технических наук, профессор, кафедра информационных технологий и информационной безопасности.

Information about the authors.

Gyulkhanum I. Kachaeva– Cand. Sci. (Economics), Department of Information Technology and Information Security.

Arslan G. Mustafayev - Dr.Sci. (Technical), Prof., Department of Information Technology and Information Security.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 02.02.2018.

Принята в печать 30.05.2018.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 02.02.2018.

Accepted for publication 30.05.2018.

Для цитирования: Кузнецов И.Е., Мельников А.В., Rogozin E.A., Страшко О.В. Методика учета влияния метеорологических факторов на эффективность применения беспилотных летательных аппаратов на основе системного анализа. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2018; 45 (2): 125-139. DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-2-125-139

For citation: Kuznetsov I.E., Melnikov A.V., Rogozin E.A., Strashko O.V. Methodology for accounting the influence of meteorological factors on the efficiency of application of unmanned aerial vehicles on the basis of system analysis. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2018; 45 (2): 125-139. (in Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-2-125-139

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ
ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 551.501.81-623.746

DOI: 10.21822/2073-6185-2018-45-2-125-139

МЕТОДИКА УЧЕТА ВЛИЯНИЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА
ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ
АППАРАТОВ НА ОСНОВЕ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА

Кузнецов И.Е.⁴, Мельников А.В.², Rogozin E.A.¹, Страшко О.В.³

¹Воронежский институт МВД России,

¹394065, г. Воронеж, пр. Патриотов, 53, Россия,

²⁻⁴Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского
и Ю. А. Гагарина,

²⁻⁴394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, Россия,

¹e-mail: evgenirogozin@yandex.ru, ²e-mail: alexei.melnikov90@yandex.ru

³e-mail: strashko57@yandex.ru, ⁴e-mail: vaiumet@mail.ru

Резюме: Цель. Целью исследования является повышение эффективности применения беспилотных летательных аппаратов (БЛА) в условиях влияния дестабилизирующих факторов, обусловленных метеорологическими причинами, на основе выявления связей и закономерностей их функционирования в сложных погодных условиях. **Метод.** Применены методы системного анализа, математического моделирования атмосферных явлений и процессов, теории вероятности и статистического оценивания. **Результат.** Проведён анализ открытых литературных источников по вопросам эксплуатации и практического применения беспилотных летательных аппаратов (БЛА) в условиях воздействий факторов внешней среды. Приведена классификация дестабилизирующих воздействий (ДВ), влияющих на выполнение полетного задания БЛА. Обоснован динамический вероятностный показатель «временная эффективность выполнения полетного задания БЛА», характеризующий динамику функционирования БЛА как сложную техническую систему. Разработана методика оценки динамического показателя эффективности функционирования БЛА при выполнении полетного задания (ПЗ) в условиях ДВ, на основе применения вероятностной модели конфликтного взаимодействия между БЛА и ДВ. Приведены стратегии выбора траектории облета локальных зон, в которых на БЛА могут повлиять ДВ. Для оценки интенсивности ДВ и определения размеров зоны локальных возмущений предложена математическая модель. Использование методов теории конфликта в процессе построения модели функционирования БЛА позволило разработать адекватные модели анализа и оценки динамического показателя эффективности функционирования БЛА при выполнении полетного задания в условиях ДВ, а также выявить закономерности влияния метеорологических факторов на эффективность БЛА. **Вывод.** Предложенная методика позволяет повысить эффективность применения беспилотных летательных аппаратов (БЛА) в сложных метеорологических условиях по временному показателю на 20-30 % по сравнению с традиционными подходами.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, дестабилизирующее воздействие, продолжительность полета, эффективность функционирования, погодные явления

TECHNICAL SCIENCE
COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT

METHODOLOGY FOR ACCOUNTING THE INFLUENCE OF METEOROLOGICAL FACTORS ON
THE EFFICIENCY OF APPLICATION OF UNMANNED AERIAL
VEHICLES ON THE BASIS OF SYSTEM ANALYSIS

Ilya E. Kuznetsov⁴, Aleksey V. Melnikov², Evgenii A. Rogozin¹, Oleg V. Strashko³,

¹*Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia,*

¹*53 Patriotov Str., Voronezh 394065, Russia,*

²⁻⁴*Military Educational and Scientific Center of the Air Force
named after N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin,*

²⁻⁴*54A Starykh Bolshevikov Str., Voronezh 394064, Russia,*

¹*e-mail: evgenirogozin@yandex.ru, ²e-mail: alexei.melnikov90@yandex.ru*

³*e-mail: strashko57@yandex.ru, ⁴e-mail: vaiumet@mail.ru*

Abstract Objectives The aim of the study is to increase the effectiveness of unmanned aerial vehicles (UAVs) in the context of destabilising meteorological factors on the basis of an identification of links and patterns of unmanned aerial vehicles operating in difficult weather conditions. **Methods** In this work, in order to account for the effect of meteorological factors on the effectiveness of unmanned aerial vehicles, the methods of system analysis, mathematical modelling of atmospheric phenomena and processes, as well as probability theory and statistical assessment, were applied. **Result** An analysis of open literature sources devoted to the issues of operation and practical application of unmanned aerial vehicles (UAVs) under the influence of environmental factors was carried out. A classification of destabilising influences (DI) affecting the performance of a UAV flight mission is developed and presented. The dynamic probabilistic indicator, which, in characterising the dynamics of UAV functions as a complex technical system is referred to as “time efficiency of the UAV flight mission”, is substantiated. A methodology for estimating the dynamic efficiency indicator of the UAV’s functionality during the performance of a flight mission (FM) under DI conditions is developed on the basis of a probabilistic model of the conflicting interaction between UAV and DI. Strategies for selecting the trajectories of flights around local zones in which UAVs can be influenced by DI are given. To estimate the DI intensity and determine the size of the local disturbance zone, a mathematical model is proposed, whose application makes it possible to improve the UAV functioning under complex meteorological conditions (CMC) by taking into account the information on the space-time variability of dangerous for UAV weather-related phenomena (DWP). In the process of constructing the UAV functioning model, the use of conflict theory methods permitted adequate models for the analysis and evaluation of the dynamic efficiency indicator of the UAV functioning during the performance of FM in DI conditions to be developed, as well as the patterns of meteorological factors influencing the effectiveness of the UAV application to be revealed. **Conclusion** The methodology proposed in the article makes it possible to increase the effectiveness of unmanned aerial vehicles (UAVs) under complex meteorological conditions by a time index of 20-30% as compared with traditional approaches.

Keywords: *unmanned aerial vehicle, UAV, destabilising influence, flight duration, operational efficiency, weather phenomena*

Введение. Сфера применения БЛА в настоящее время охватывает практически все виды человеческой деятельности. Долгое время БЛА разрабатывались исключительно для нужд армии – разведки, целеуказания, постановки помех, нанесения точечных ударов по объектам противника, и т.д. Применение БЛА в гражданских целях также позволяет выполнять различные задачи. Обеспечение безопасности мест массового скопления людей, патрулирование улиц, охрана объектов. МЧС России широко использует БЛА для разведки и патрулирования при пожарах, наводнениях и других ЧС. Аэрофотосъемка с использованием БЛА применяется при изучении труднодоступных геологических тел. Осуществляется мониторинг нефтегазовых тру-

бопроводов, линий электропередач, дорожных покрытий.

Применение БЛА для решения перечисленных задач сопровождается рядом ограничений, накладываемых на систему управления (СУ) полетом, в особенности, если речь идет об использовании БЛА, выполняющих ПЗ в автономном режиме. Влияние факторов внешней среды на БЛА может существенно снизить качество выполнения ПЗ, а при определенных значениях параметров ДВ может и вовсе исключить возможность применения БЛА.

Анализ открытых литературных источников и нормативных документов МЧС России, Минтранса РФ показал [1-9], что решение задач, связанных с сохранением эффективного функционирования БЛА в различных климатических условиях является важным этапом при составлении требований к бортовому оборудованию БЛА, обеспечивающему безопасность полетов в аварийных ситуациях, возникающих под действием различных погодных явлений. Методы решения данных задач также необходимо учитывать при разработке автономной СУ БЛА, обеспечивающей перемещение БЛА по заданной траектории.

Постановка задачи. Для разработки методики оценки динамического показателя эффективности функционирования БЛА при выполнении ПЗ, включающей в свой состав математическую модель и алгоритм конфликтного взаимодействия БЛА и ДВ необходимо:

1. Разработать на основе анализа открытых литературных источников классификационную схему ДВ, влияющих на выполнение ПЗ БЛА;

2. Разработать структурно-логическую модель конфликтного взаимодействия БЛА и ДВ при выполнении ПЗ;

3. Обосновать и разработать динамический показатель эффективности функционирования БЛА в условиях ДВ;

4. На основе разработанного показателя эффективности составить набор стратегий – управляющих воздействий по корректировке траектории полета при возникновении ДВ на эшелоне полета БЛА;

5. Разработать математическую модель для получения прогностических значений метеорологических величин, оказывающих влияние на полет БЛА.

Метод исследования. С целью решения вышеуказанных научных задач необходимо использовать и практически применить методы системного анализа, математического моделирования атмосферных явлений и процессов, теории вероятности и статистического оценивания. В процессе функционирования БЛА выделяют три сложных этапа полета: полет к зоне выполнения ПЗ, выполнение ПЗ, возвращение на стартовую площадку. Первый этап включает в себя взлет, набор высоты, выход в заданный эшелон полета и собственно полет к зоне выполнения ПЗ. На втором этапе происходит снижение БЛА до определенной высоты, на которой будет происходить выполнение ПЗ. На третьем этапе также происходит набор высоты и возвращение на стартовую площадку на заданном эшелоне, а также посадка.

На всех перечисленных этапах полета БЛА должен лететь по строго намеченному курсу, с наименьшими отклонениями от заданной траектории. Отклонение от заданной траектории может иметь допустимые граничные значения, которые задаются исходя из ГТХ БЛА. В тоже время, на БЛА может быть оказано ДВ, которое выведет его за пределы допустимой зоны отклонения. В этом случае СУ БЛА должна принять меры по возвращению БЛА на заданную траекторию полета. От того насколько быстро БЛА будет возвращен на заданную траекторию будет зависеть эффективность его применения. Продолжительность полета БЛА является одним из показателей эффективности его применения.

Источники ДВ могут быть природного и техногенного характера и могут оказывать неблагоприятное воздействие на СУ БЛА, обеспечивающую перемещение по заданной траектории. Анализ открытых литературных источников [7-14] позволяет составить классификацию ДВ, оказывающих неблагоприятное влияние на БЛА в ходе выполнения ПЗ, которая представлена на рис. 1.

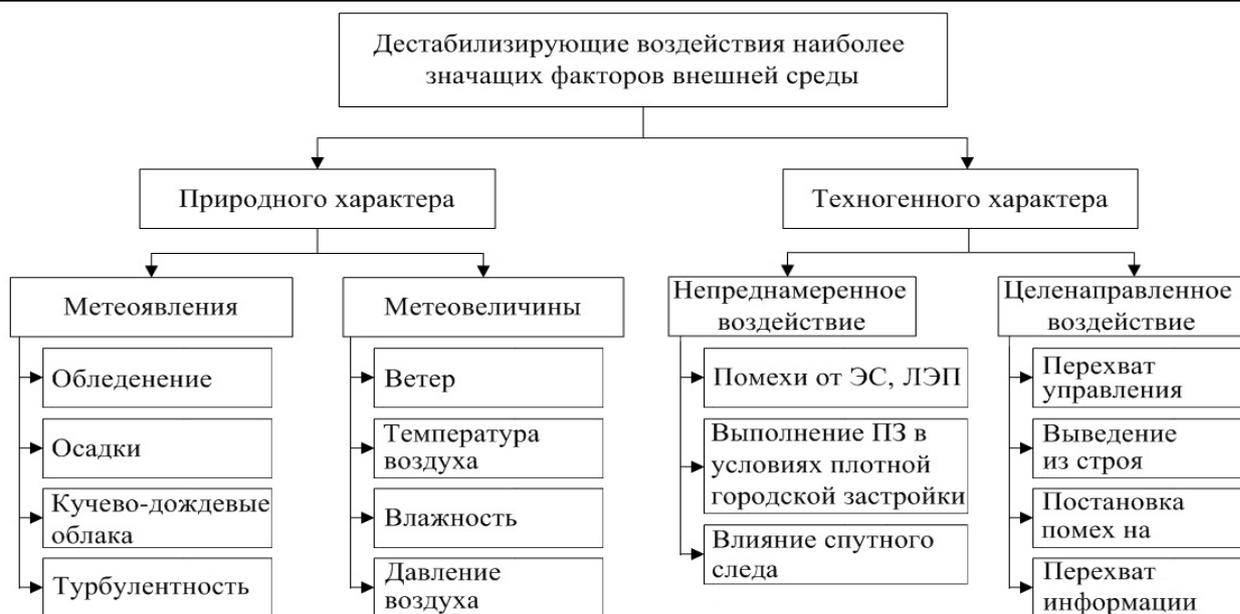


Рис.1. Классификация дестабилизирующих воздействий
Fig. 1. Classification of destabilizing effects

Как видно из приведенной классификации, БЛА в ходе своего функционирования подвергается различным ДВ. Из приведенной на рис.1 классификации, будем рассматривать ДВ природного происхождения, которые оказывают наибольшее влияние на изменение траектории полета БЛА. Последовательность и содержание действий оператора БЛА, либо СУ БЛА при организации автономного полета, на различных этапах возникновения ДВ разработаны на основе правил управления БЛА в условиях влияния ДВ [17].

Для математического описания и исследования подобных задач используется модель динамического конфликта [15], которая в сочетании с теорией случайных процессов позволяет разрабатывать математические модели динамики функционирования сложных иерархических систем, отвечающие требованиям по адекватности и точности получаемых результатов.

Для описания динамики влияния ДВ на функционирование БЛА, целесообразно использовать методы полумарковских процессов [16], которые позволяют получить наиболее адекватные модели случайных процессов с последствием и произвольными законами распределения переходных характеристик.

В соответствии с технологией использования методов динамического конфликта и теории полумарковских процессов [15-16], разработка аналитических моделей реальных процессов осуществляется в три этапа:

1. Разработка структурно-логической модели исследуемого процесса, отражающей его наиболее существенные с точки зрения решаемых исследовательских задач стороны.

2. Разработка динамического графа случайного полумарковского процесса, эквивалентного вербальной модели, а также исходной системы интегро-дифференциальных уравнений, описывающей обусловленные плотности распределения вероятности (ПРВ) перехода процесса из начального в конечные состояния.

3. Выбор табулированных ПРВ, наиболее точно аппроксимирующих вероятностно-временные характеристики (ВВХ) моделируемых процессов и разработка способа вычисления выходного показателя по исходной системе интегро-дифференциальных уравнений.

В данной статье подробно рассмотрим реализацию первого этапа.

Структурно-логическая модель динамического конфликта между ДВ и СУ БЛА, описывающая динамику влияния ДВ на функционирование БЛА, представлена на рис.2.

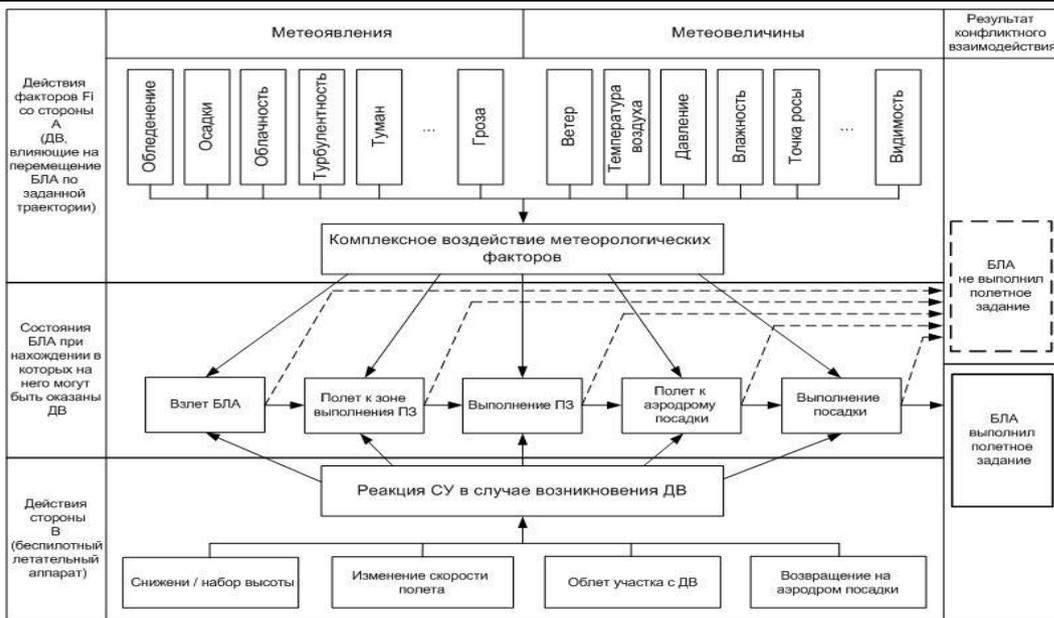


Рис. 2. Структурно-логическая модель конфликтного взаимодействия беспилотных летательных аппаратов – факторы внешней среды

Fig. 2. Structural and logical model of conflict interaction of unmanned aerial vehicles - environmental factors

Как известно из теории эффективности технических систем [18], показатель эффективности операции есть мера степени соответствия реального результата операции требуемому. Основным требованием при выборе показателя эффективности является соответствие показателя цели операции, которая отображается требуемым результатом.

В нашем случае основным требованием к БЛА является доставка полезной нагрузки до места выполнения ПЗ и возвращения на стартовую площадку в условиях влияния ДВ за минимальное (рассчитанное) время. На преодоление ДВ затрачиваются внутренние энергетические ресурсы, что сокращает время нахождения БЛА в полете. Соответственно эффективность функционирования БЛА во времени будет изменяться, рис. 3.

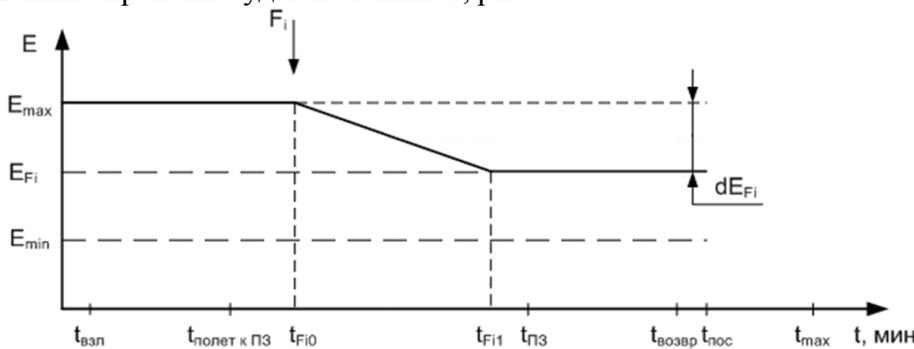


Рис. 3. График изменения эффективности функционирования беспилотных летательных аппаратов под влиянием дестабилизирующих воздействий факторов внешней среды
Fig. 3. Graph of changes in the performance of unmanned aerial vehicles under the influence of the destabilizing effects of environmental factors

Максимальное значение эффективности функционирования БЛА – E_{max} будет сохраняться до момента появления ДВ, и достигнет значения E_{Fi} после воздействия i -го фактора внешней среды F_i . Если эффективность функционирования БЛА опустится ниже минимального значения E_{min} , то можно говорить о том, что БЛА не выполнит ПЗ, так как заданное время выполнения ПЗ $t_{зад}$, превысит максимальное допустимое время нахождения в полете t_{max} (обусловлено тактико-техническими характеристиками (ТТХ) БЛА).

После того как СУ отработает ДВ, эффективность функционирования БЛА выходит на новое устоявшееся значение, которое отличается от E_{\max} на величину dE_{Fi} .

Общее время выполнения ПЗ $t_{зад}$, рассчитывается по формуле:

$$t_{зад} = t_{взл} + t_{полет\ к\ ПЗ} + t_{ПЗ} + t_{возвр} + t_{нос}, \quad (1)$$

где: $t_{взл}$ – взлет БЛА; $t_{полет\ к\ ПЗ}$ – полет к зоне выполнения ПЗ; $t_{ПЗ}$ – выполнение ПЗ; $t_{возвр}$ – время возвращения на стартовую площадку; $t_{нос}$ – посадка БЛА.

В качестве основы для составления показателя эффективности функционирования БЛА будем использовать время $t_{ДВ}$, в течение которого на БЛА оказывалось ДВ:

$$t_{ДВ} = \sum_{i=1}^n (t_{Fi1} - t_{Fi0}), \quad (2)$$

где: t_{Fi0} – время начала влияния ДВ; t_{Fi1} – время окончания отработки ДВ.

В результате влияния ДВ БЛА может быть выведен за пределы заданной траектории полета. Задача СУ, заключающаяся в поддержке заданного курса БЛА, считается выполненной, если величина $t_{ДВ}$ не превышает некоторой максимально допустимой величины $t_{резерв}$:

$$t_{резерв} = t_{\max} - t_{зад}. \quad (3)$$

Поскольку $t_{ДВ}$ и $t_{резерв}$ в общем случае являются случайными величинами, в качестве показателя эффективности функционирования БЛА будем использовать вероятность того, что время нахождения БЛА под влиянием ДВ не превысит резервного времени нахождения в полете:

$$E = P(t_{ДВ} \leq t_{резерв}). \quad (4)$$

Данный показатель является количественной оценкой, отражающей вероятность возникновения неблагоприятных погодных условий и относительной оперативности решения своих задач СУ БЛА. Вместе с этим необходимо учитывать интенсивность ДВ.

Таким образом, время нахождения БЛА под влиянием ДВ зависит от фактора внешней среды F_i и его интенсивности I_i . Интенсивность ДВ определяется по предварительному метеорологическому прогнозу. Если на БЛА оказывается влияние нескольких факторов внешней среды F_i одновременно, СУ начинает обрабатывать с того фактора, который действует с максимальной интенсивностью F_{\max} :

$$F_{\max} = \max\{F_i\}. \quad (5)$$

Одним из факторов внешней среды F_i , оказывающих непосредственное влияние на эффективность функционирования как самого БЛА, так и установленной на его борту аппаратуры являются погодные условия. Анализ технических характеристик БЛА показал, что по метеорологическим условиям в процессе эксплуатации имеется ряд ограничений, представленных в табл.1. При этом интенсивность дестабилизирующего воздействия I_i зависит от степени гидрометеорологических условий.

Таблица 1. Интенсивность дестабилизирующего воздействия, влияющего на беспилотный летательный аппарат и его целевую нагрузку в зависимости от степени гидрометеорологических условий

Table 1. The intensity of the destabilizing effect affecting the unmanned aerial vehicle and its target load, depending on the degree of hydrometeorological conditions

Метеорологические факторы дестабилизирующих воздействий	Интенсивность I_i		
	Слабая, I_1	Умеренная, I_2	Сильная, I_3
Высота нижней границы облачности (F_1)	1000-1500 м	500 – 1000 м	Менее 500 м
Метеорологическая дальность видимости (F_2)	6 – 10 км	1 – 5 км	Менее 1 км
Скорость ветра (F_3)	до 10м/с	10 – 15м/с	Более 15 м/с
Явления погоды (гроза, обледенение, болтанка БЛА) (F_4)	Слабой интенсивности	Умеренной интенсивности	Сильной интенсивности

В случае возникновения ДВ на маршруте полета БЛА, рассчитанная траектория полета $h1$ между точками А и В должна быть скорректирована, рис.4.

В отсутствии сведений о гидрометеорологических условиях (ГМУ) на маршруте полета, оператор может принять решение об облете локальных зон возмущений z_1 и z_2 по наименее выгодной траектории $h3$, затратив при этом время $t_{безучетаГМУ}$:

$$t_{безучетаГМУ} = t'_1 + t'_2. \quad (6)$$

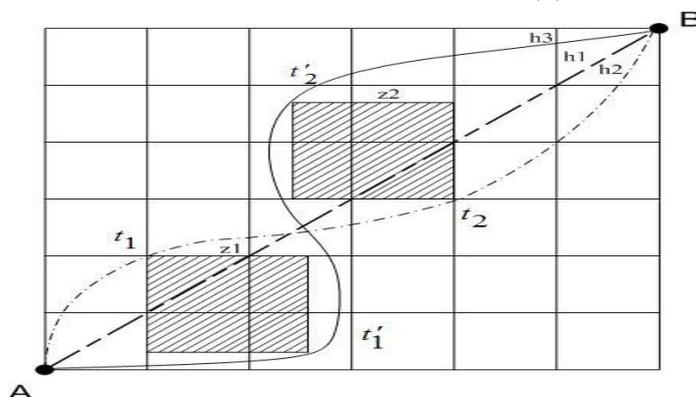


Рис. 4. Корректировка траектории полета беспилотного летательного аппарата при наличии локальных зон возмущений

Fig. 4. Correction of the flight path of an unmanned aerial vehicle in the presence of local zones of disturbances

С учетом ГМУ, в зависимости от скорости и направления перемещения локальных возмущений ДВ z_1 и z_2 , траектория полета может быть скорректирована и, например, иметь вид $h2$, при этом будет затрачено время $t_{с учетом ГМУ}$:

$$t_{с учетом ГМУ} = t_1 + t_2. \quad (7)$$

Рассмотренная ситуация показывает, что в случае когда ГМУ будут учтены при корректировке траектории полета, общее время выполнения ПЗ сократится на 20-30 %:

$$K_{\text{эф}} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \left(1 - \frac{t_{i \text{ с учетом ГМУ}}}{t_{i \text{ без учета ГМУ}}} \right), \quad (8)$$

где: $K_{\text{эф}}$ – коэффициент эффективности; n – количество локальных зон возмущений;
 $t_{i \text{ с учетом ГМУ}}$ – время облета i -ой зоны локального возмущения с учетом ГМУ,
 $t_{i \text{ без учета ГМУ}}$ – время облета i -ой зоны локального возмущения без учета ГМУ.

Рассмотрим случай, когда наилучшим вариантом облета локальных возмущений является траектория h_2 . При корректировке траектории полета БЛА необходимо руководствоваться следующими стратегиями управления:

- если время t_{h_2} , затрачиваемое на облет локальных возмущений ДВ по траектории h_2 , меньше времени преодоления ДВ $t_{ДВi}$, и t_{h_2} меньше времени резерва $t_{резерв}$, то возможен облет по траектории h_2 :

$$u1 : t_{h_2} < t_{ДВi} \wedge t_{h_2} < t_{резерв} \Rightarrow h_2; \quad (9)$$

- если время t_{h_2} , затрачиваемое на облет локальных возмущений ДВ по траектории h_2 , больше времени преодоления ДВ $t_{ДВi}$, и $t_{ДВi}$ меньше времени резерва $t_{резерв}$, то целесообразно пролететь через зону локального возмущения:

$$u2 : t_{h_2} > t_{ДВi} \wedge t_{ДВi} < t_{резерв} \Rightarrow h1; \quad (10)$$

- если время t_{h_2} , затрачиваемое на облет локальных возмущений ДВ по траектории h_2 , больше времени преодоления ДВ $t_{ДВi}$, и $t_{ДВi}$ больше времени резерва $t_{резерв}$, то можно утверждать что ПЗ не будет выполнено и нужно возвращаться на стартовую площадку:

$$u3 : t_{h_2} > t_{ДВi} \wedge t_{ДВi} > t_{резерв} \Rightarrow \text{возвращение на стартовую площадку}. \quad (11)$$

Таким образом, для корректировки траектории полета СУ БЛА использует различные стратегии u , в зависимости от ТТХ БЛА, геометрических размеров зоны локальных возмущений ДВ и интенсивности фактора внешней среды.

Обсуждение результатов. В настоящее время оценка и прогноз интенсивности фактора внешней среды осуществляется на основе разнородной информации радиолокационной, спутниковой, данных наземных наблюдений имеющих низкую пространственно-временную изменчивость. Это затрудняет прогноз метеообстановки в условиях мезомасштаба.

Вместе с тем, выше описанная изменчивость метеорологических величин и явлений погоды особенно велика в условиях конвективно-неустойчивой атмосферы.

В этих условиях наблюдается интенсивное развитие таких опасных явлений погоды как обледенение, болтанка БЛА, горизонтальные и вертикальные сдвиги ветра, гроза. Их прогноз для пространственного масштаба применения БЛА (100-500 км), с помощью существующих подходов затруднен. Поэтому в работе предлагается использование математических зависимостей, описывающих физические процессы, протекающие в атмосфере и приводящие к ОЯП на основе их моделирования.

Для оценки интенсивности фактора внешней среды, под которым в работе рассматриваются метеоусловия, и определения размеров зоны локальных возмущений была предложена математическая модель. Модель построена путем функционального объединения ряда частных моделей: модели, учитывающей гидротермодинамические, микрофизические и электрические процессы в атмосфере. Структурная схема модели представлена на рис. 5.

Гидротермодинамический блок модели состоит из дифференциальных нелинейных уравнений движения, описывающего влажную конвекцию, силы плавучести с учетом коэффициента вовлечения. Микрофизический блок описывает процессы взаимодействия частиц в поле силы тяжести, их перенос воздушными потоками, а также коагуляцию облачных частиц под влиянием электрического поля облака. Электрический блок учитывает влияние электрического поля на эффективность столкновения заряженных капель.

Степень данной зависимости определяется размерами частиц, знаком и величиной их зарядов. Кроме эффекта поляризации капель, электрическое поле вызывает изменение скорости движения заряженных частиц, если их размеры достаточно малы. Чем меньше относительные скорости движения капель, тем больше импульс электрических сил. Поэтому электрические поля оказывают значительное влияние на протекающие процессы [19]. Взаимосвязь и взаимообусловленность данных уравнений дает возможность оценить энергетические запасы облачной атмосферы.



Рис. 5. Модель прогностических характеристик атмосферы
Fig. 5. Model of prognostic characteristics of the atmosphere

В формализованном виде эта модель может быть представлена с помощью системы уравнения движения (12) [20], в терминах функции Экснера, линеаризованного по термодинамическим переменным и учитывающие, адвективный и турбулентный перенос субстанций, силы плавучести, трения и барических градиентов:

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} = -\theta_{\phi} \cdot \nabla \pi' + \vec{n}_z g \left(\frac{\theta'}{\theta} - s' \right) + [\vec{V} \times \vec{f}] + \frac{1}{\rho} \Delta' \vec{V} \quad (12)$$

уравнения неразрывности для глубокой конвекции с учетом гидростатической сжимаемости воздуха (13) [21]:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = \sigma w, \sigma = -\frac{d}{dz} [\ln \rho_{\phi cs}(z)] \cong 10^{-4} \text{ км}^{-1}, \rho_{\phi cs}(z) = \rho_0 \left(\frac{T_0}{T_0 - \gamma_z} \right)^{\left(\frac{g}{R_c j} - 1 \right)} \quad (13)$$

уравнений термодинамики с учетом выделяемого тепла фазовых переходов воды (14, 15) [22]:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) \theta = \frac{1}{\rho C_p} \left[L_c M_c + L_s \sum_s M_s + L_f M_f \right] + \Delta' \theta, \theta = T \left(\frac{1000}{P} \right)^{0.288} \quad (14)$$

$$\frac{\partial s}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) s = -M_c - M_s + \Delta' s, \quad (15)$$

уравнений микрофизики (16) [23]:

$$\frac{dm}{dt} = 4\pi r^2 \frac{dr}{dt}, \quad \frac{dr_g}{d\tau} = D \frac{\rho_{ex}}{\rho_g} \frac{1}{r_g} \frac{\mu}{M} \frac{E_g}{P} (f-1), \quad \frac{dr_l}{d\tau} = D \frac{\rho_{ex}}{\rho_l} \frac{1}{r_l} \frac{\mu}{M} \frac{E_g}{P} (f - \frac{E_l}{E_g}) \quad (16)$$

уравнения, учитывающего электрические процессы в атмосфере (17) [24]:

$$E(r^*, r) = \frac{1}{r^{*2}} \left[\frac{45 \cdot (\varepsilon - 1) \cdot q^2}{16 \rho g \cdot (\varepsilon + 2) \cdot (r^{*2}/r^2 - 1)} \right]^{\frac{2}{5}}, \quad (17)$$

уравнения для расчета водности и ледности (18, 19) [25]:

$$W_{i,j,k}^t = \sum_{i_m=0}^{\infty} i_m h_m f_{1,i,j,k}^{t,i_m} h_m, \quad (18)$$

$$I_{i,j,k}^t = \sum_{i_m=0}^{\infty} i_m h_m f_{2,i,j,k}^{t,i_m} h_m. \quad (19)$$

где $q = K \cdot r^2$, $(\vec{V} \cdot \nabla) = u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} + w \frac{\partial}{\partial z}$, $\Delta' = \frac{\partial}{\partial x} K \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} K \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} K \frac{\partial}{\partial z}$, $\pi = C_p \left(\frac{p}{p_0} \right)^\xi$, p_0 – произвольное значение фонового давления (для удобства расчетов $p_0 = 1000$ гПа), $\xi = \frac{R_c}{C_p}$, (R_c и C_p – удельные газовая постоянная и теплоемкость при постоянном давлении сухого воздуха), \vec{n}_z – орт оси z, $\vec{V} = \{u, v, w\}$ – вектор скорости, $u(\vec{r})$, $\theta(\vec{r})$, $w(\vec{r})$ – компоненты вектора скорости воздушных потоков в облаке; $[\vec{V} \times \vec{f}]$ – параметр, учитывающий угловую скорость вращения Земли; $\theta(\vec{r})$ – потенциальная температура; $\pi(\vec{r}) = C_p \bar{\theta} (p(x, y, z)/1000)^{R_c/C_p}$ – безразмерное давление; $\bar{\theta}$ – средняя потенциальная температура; $s(\vec{r})$ – удельная влажность воздуха; $Q_s(\vec{r})$ – суммарное отношение смеси жидкой и твердой фаз в облаке; $\sigma(z)$ – параметр, учитывающий изменение плотности воздуха с высотой; $P(\vec{r})$ и $T(\vec{r})$ – соответственно давление и температура; L_c, L_s, L_f – соответственно удельная теплота конденсации, сублимации и замерзания; $\pi'(\vec{r}), \theta'(\vec{r}), s'(\vec{r})$ – отклонения безразмерного давления, потенциальной температуры и удельной влажности от их фоновых значений в окружающей атмосфере $\pi_\phi(\vec{r}), \theta_\phi(\vec{r})$ и $s_\phi(\vec{r})$; M_k, M_s – изменения удельной влажности за счет диффузии пара на капли и кристаллы; M_f – масса капельной воды, замерзающей в единицу времени в единице объема воздуха; $K(\vec{r})$ – коэффициент турбулентной диффузии, r – радиус облачных частиц; r^* – начальный радиус облачных частиц; q – заряд аэрозольной частицы, $E(r^*, r)$ – коэффициент коагуляции, g, ε – физические константы [26].

При этом начальные и граничные условия имеют вид (20):

$$\begin{aligned}
 \theta(x, y, z, 0) &= \theta_0(x, y, z), s(x, y, z, 0) = s_0(x, y, z), \varphi(x, y, z, 0) = \varphi_0(x, y, z), \\
 \theta(0, y, z, t) &= \theta_{x_0}(y, z, t), \theta(x, 0, z, t) = \theta_{y_0}(x, z, t), \theta(x, y, 0, t) = \theta_{z_0}(x, y, t), \\
 s(0, y, z, t) &= s_{x_0}(y, z, t), s(x, 0, z, t) = s_{y_0}(x, z, t), s(x, y, 0, t) = s_{z_0}(x, y, t), \\
 \varphi(0, y, z, t) &= \varphi_{x_0}(y, z, t), \varphi(x, 0, z, t) = \varphi_{y_0}(x, z, t), \varphi(x, y, 0, t) = \varphi_{z_0}(x, y, t), \\
 \varphi(L_x, y, z, t) &= \varphi_{x_L}(y, z, t), \varphi(x, L_y, z, t) = \varphi_{y_L}(x, z, t), \varphi(x, y, L_z, t) = \varphi_{z_L}(x, y, t),
 \end{aligned}
 \tag{20}$$

где $\varphi = \{u, v, w\}$.

Таким образом, состояние атмосферы будет описываться совокупностью протекающих в ней процессов, формализованных выражениями (12-19), а соответствующая априорная информация позволит получить прогностические характеристики параметров атмосферы.

Реализация этой модели позволяет получить в каждой пространственно-временной точке информацию о метеопараметрах и явлениях погоды, представленных в таблице.

Используя эти данные, на основании формул (12-19) с учетом имеющихся ограничений на выполнение полета БЛА, был проведен численный эксперимент с использованием данных температурно-ветрового зондирования атмосферы на заданной территории применения БЛА в период максимальной конвективной неустойчивости за период наблюдения с 2013 по 2017 года [27].

Отдельные реализации модели (12-19) представлены на рис. 6-7.

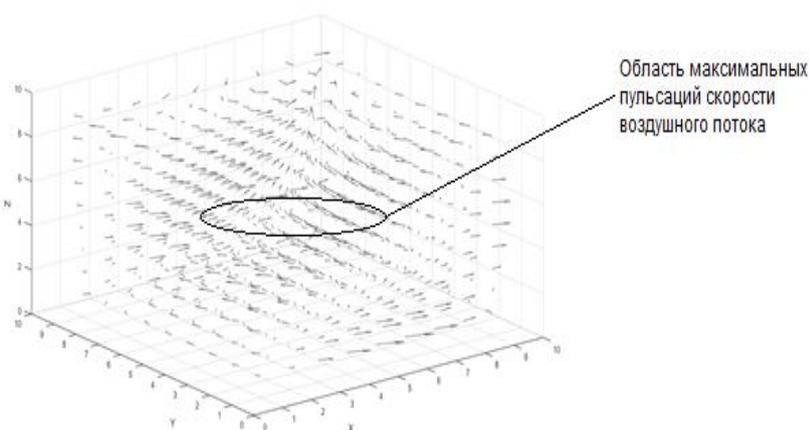


Рис.6. Поле скоростей воздушного потока при отсутствии дестабилизирующего воздействия (в условиях штилевой атмосферы)

Fig.6. Air flow velocity field in the absence of destabilizing effects (in calm conditions)

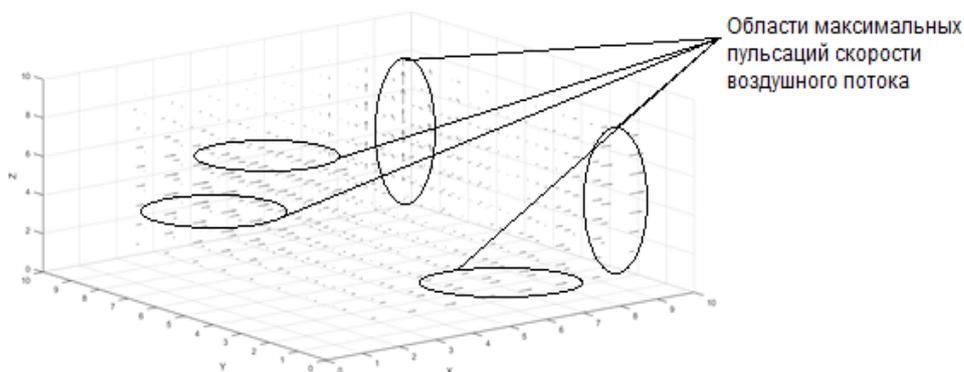


Рис. 7. Поле скоростей потока в момент времени t_{F10} начала влияния дестабилизирующего воздействия при наличии возмущений окружающего воздуха

Fig. 7. The flow velocity field at the time t_{F10} of the onset of the influence of the destabilizing effect in the presence of ambient air disturbances

Вывод. Анализ полученных результатов показал, что значения метеовеличин испыты-

вают значительную изменчивость даже в пределах однородной воздушной массы и определяются стратификацией атмосферы, а также условиями подстилающей поверхности и рядом других стохастических факторов. Если не учитывать метеовеличины в оперативной практике обеспечения полетов БЛА, то эффективность их применения значительно снизится.

В статье предложена методика расчета динамического показателя эффективности применения БЛА. Разработана методика выбора траектории облета локальных зон ДВ. Проведен анализ дестабилизирующих факторов внешней среды, влияющих на эффективность применения БЛА и выявлены их количественные показатели. Разработана математическая модель пространственно-временной изменчивости значений метеовеличин, влияющих на применение БЛА в условиях конвективно-неустойчивой атмосферы. Проведена оценка эффективности методики учета влияния метеорологических факторов на продолжительность полета БЛА по показателю общего времени выполнения задания БЛА.

Таким образом, в статье предложена методика, учитывающая влияние метеорологических факторов на продолжительность полета БЛА, основанная на принципах системного анализа, которая позволяет повысить эффективность применения БЛА в СМУ, обусловленных конвективно-неустойчивой атмосферой в среднем на 20-30 %.

Библиографический список:

1. Решение коллегия МЧС России «О Временных единых технических требованиях к робототехническим комплексам, беспилотным летательным аппаратам и прикладному программному обеспечению, к ним» [Электронный ресурс RL]: http://www.mchs.gov.ru/upload/site1/document_file/FVCQ8zUL4f.pdf (дата обращения 17.01.18).
2. Методические указания по применению беспилотных летательных аппаратов для обследования воздушных линий электропередачи энергетических объектов. Стандарт организации ПАО «ФСК ЕЭС». [Электронный ресурс]. URL: http://www.fsk-ees.ru/upload/docs/STO_56947007-29.200.10.235-2016.pdf (дата обращения: 17.01.18).
3. Приказ Минтранса РФ от 31 июля 2009 г. N 128 «Об утверждении Федеральных авиационных правил "Подготовка и выполнение полетов в гражданской авиации Российской Федерации» (с изменениями и дополнениями). [Электронный ресурс]. URL: <http://base.garant.ru/196235/> (дата обращения: 17.01.18).
4. Мельников А.В. Построение оптимальной траектории полета беспилотного летательного аппарата при выполнении задачи поиска / А.В. Мельников, В.А. Гайдай, Е.А. Рогозин // Вестник Воронежского института МВД России. – 2017. – № 1. – С. 52–62.
5. Максимов А.Н. Боевые комплексы беспилотных летательных аппаратов. Научно-методические рекомендации. Издание ВВИА имени профессора Н.Е. Жуковского. 2005. – 236 с.
6. Моисеев Г.В., Моисеев В.С. Основы теории создания и применения имитационных беспилотных авиационных комплексов: монография. – Казань: Редакционно-издательский центр, 2013. – 208 с. (Серия «Современная прикладная математика и информатика»).
7. Моисеев В.С. Прикладная теория управления беспилотными летательными аппаратами: монография. – Казань: ГБУ «Республиканский центр мониторинга качества образования», 2013. – 768 с. (Серия «Современная прикладная математика и информатика»).
8. Наровлянский Г.Я. Авиационная климатология. Л.: Гидромет. изд-во, 1968. С. 110–112.
9. Позднякова В.А. Практическая авиационная метеорология. Екатеринбург: Уральский УТЦ ГА, 2010. С. 150.
10. Горбунов А.А. Влияние метеорологических факторов на применение и безопасность полёта беспилотных летательных аппаратов с бортовым ретранслятором радиосигнала [Текст] / Горбунов А.А., Галимов А.Ф. // Вестник Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России. – 2016. – Вып. №1. – С. 7–15.
11. Anandrao Shesherao Biradar. Wind Estimation and Effects of Wind on Waypoint Navigation of UAVs. / A Thesis Presented in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree Master of Science. Arizona State University. May 2014.
12. Martin Sele. Wind Corrections in Flight Path Planning / International Journal of Advanced Robotic Systems // Martin Sele, Petr Van, Milan Rollo, Tomas Meiser. Received 13 Jun 2012; Accepted 27 Jan 2013.
12. Daniel Stojcsics, Andras Molnar. Autonomous takeoff and landing control for small size unmanned aerial vehicles / Computing and Informatics, Vol. 32, 2013, 1117–1130.

13. Jack W. Langelaan. Wind Field Estimation for Small Unmanned Aerial Vehicles. /AIAA Guidance, Navigation and Control Conference, Toronto, Canada // Jack W. Langelaan, Nicholas Alley, James Neidhoefer. American Institute of Aeronautics and Astronautics. Paper 2010-8177.
14. Дружинин В.В. Введение в теорию конфликта / В.В. Дружинин, Д.С. Конторов, М.Д. Конторов. - М.: Радиоисвязь, 1989. - 288 с.
15. Тихонов В.И. и Миронов М.А. Марковские процессы. - М.: Сов. Радио, 1977.
16. Методические указания по применению беспилотных летательных аппаратов для обследования воздушных линий электропередачи и энергетических объектов. Стандарт организации ПАО «ФСК ЕЭС»СТО 56947007- 29.200.10.235-2016. 2016 г.
17. Надежность и эффективность в технике: Справочник: В 10 т. / Ред. Совет: В.С. Авдеевский (пред.) и др. – М.: Машиностроение, 1988. – Т. 3. Эффективность технических систем / Под общ. Ред. В.Ф. Уткина, Ю.В. Крючкова. – 328 с.
18. Nguyen, Hang T.T. Klinskikh Fresh look at Lorenz-like system / Meleshenko P.A., Semenov M.E., Kuznetsov I.E., Gorlov V.A. // 2016 Progress in Electromagnetic Research Symposium (PIERS) // Shanghai, China, 2016.– P. 2255-2259, DOI: 10.1109/PIERS.2016.7734922.
19. Поташник, Э.Л., Кузнецов, А.Д. Математическое моделирование облачных процессов: учебное пособие / Э.Л. Поташник. – Санкт-Петербург. Издательство Российского государственного гидрометеорологического университета, 2010. – 444 с.
20. Шаповалов, В.А. Моделирование параметров облаков при глубокой конвекции / В.А. Шаповалов, К.А. Продан, И.Х. Машуков // Доклады Всероссийской конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы. Нальчик, 2011. – С. 100–108.
21. Коган, Е.Л. Численное моделирование облаков / Коган Е.Л., Мазин И.П., Сергеев Б.Н., Хворостьянов В.И. – М.: Гидрометеиздат, 1984, 186 с.
22. Роджерс, Р.Р. Краткий курс физики облаков / под ред. И.П. Мазина. – Ленинград.: Гидрометеиздат, 1979. – 231 с.
23. Матвеев, Л.Т. Физика атмосферы / под ред. В.Г. Морачевского. – СПб.: Гидрометеиздат, 2000. – 779 с.
24. Kuznetsov, I.E. On the interaction of electromagnetic waves with charged aerosol particles in atmosphere/ Semenov M.E., Kanishcheva O.I., Meleshenko P.A.// 2016 Progress in Electromagnetic Research Symposium (PIERS) // Shanghai, China, 2016.– P. 3542-3545, DOI: 10.1109/PIERS.2016.7735367.
25. Марчук Г.И. Методы вычислительной математики. – М.: Издательство Наука, 1977 – 352 с.
26. Кузнецов И.Е. Динамическая модель пространственно-временного распределения метеорологических параметров в условиях конвективно-неустойчивой атмосферы при использовании измерений с БЛА / И.Е. Кузнецов, О.В. Страшко, Н.М. Ситников. Сборник трудов 4 ЦНИИ «Моделирование параметров атмосферы в ракетно-космической технике» №135. – Королев, – 2017г. с. 81-86.

References:

1. Reshenie kollegii MChS Rossii “O Vremennykh edinykh tekhnicheskikh trebovaniyakh k robototekhnicheskim kompleksam, bespilotnym letatel'nykh apparatam i prikladnomu programmnomu obespecheniyu k nim”. [Elektronnyi resurs]. URL: http://www.mchs.gov.ru/upload/site1/document_file/FVCQ8zUL4f.pdf (data obrashcheniya 17.01.18). [Decision of the board of the Ministry of Emergency Measures of Russia “On temporary unified technical requirements for robotic systems, unmanned aerial vehicles and their applied software” [Electronic resource]. URL: http://www.mchs.gov.ru/upload/site1/document_file/FVCQ8zUL4f.pdf (access date 17.01.18). (in Russ.)]
2. Metodicheskie ukazaniya po primeneniyu bespilotnykh letatel'nykh apparatov dlya obsledovaniya vozdushnykh linii elektroperedachii energeticheskikh ob"ektov. Standart organizatsii PАО “FSK EES”. [Elektronnyi resurs]. URL: http://www.fsk-ees.ru/upload/docs/STO_56947007-29.200.10.235-2016.pdf (data obrashcheniya 17.01.18). [Methodical instructions for the use of unmanned aerial vehicles for the inspection of overhead power transmission lines and power facilities. The standard of organization of PАО “FSK EES”. [Electronic resource]. URL: http://www.fsk-ees.ru/upload/docs/STO_56947007-29.200.10.235-2016.pdf (access date 17.01.18). (in Russ.)]
3. Prikaz Mintransa RF ot 31 iyulya 2009 g. N 128 “Ob utverzhdanii Federal'nykh aviatsionnykh pravil “Podgotovka i vypolnenie poletov v grazhdanskoj aviatsii Rossiiskoi Federatsii” (s izmeneniyami i dopolneniyami). [Elektronnyi resurs]. URL: <http://base.garant.ru/196235/> (data obrashcheniya 17.01.18). [Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation of July 31, 2009 N 128 “On approval of the Federal Aviation Regulations “Preparation and execution of flights of the civil aviation

- of the Russian Federation” (with amendments and additions). [Electronic resource]. URL: <http://base.garant.ru/196235/> (access date 17.01.18). (in Russ.)]
4. Mel'nikov A.V., Gaidai V.A., Rogozin E.A. Postroenie optimal'noi traektorii poleta bespilotnogo letatel'nogo apparata pri vypolnenii zadachi poiska. Vestnik Voronezhskogo instituta MVD Rossii. 2017;1:52–62. [Mel'nikov A.V., Gaidai V.A., Rogozin E.A. The construction of the optimal flight path of an unmanned aerial vehicle when performing a search task. The bulletin of Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia. 2017;1:52–62. (in Russ.)]
 5. Maksimov A.N. Boevye komplekсы bespilotnykh letatel'nykh apparatov. Nauchno-metodicheskie rekomendatsii. Izdanie VVIA imeni professora N.E. Zhukovskogo. 2005. 236 s. [Maksimov A.N. Combat complexes of unmanned aerial vehicles. Scientific and methodical recommendations. Izdanie VVIA imeni professora N.E. Zhukovskogo. 2005. 236 p. (in Russ.)]
 6. Moiseev G.V., Moiseev V.S. Osnovy teorii sozdaniya i primeneniya imitatsionnykh bespilotnykh aviatsionnykh kompleksov. Seriya “Sovremennaya prikladnaya matematika i informatika”. Kazan': Redaktsionno-izdatel'skii tsentr; 2013. 208 s. [Moiseev G.V., Moiseev V.S. Fundamentals of the theory of the creation and application of imitation unmanned aerial systems. Series “Modern Applied Mathematics and Informatics”. Kazan: GBU “Republican Center for Monitoring the Quality of Education”; 2013. 208 p. (in Russ.)]
 7. Moiseev V.S. Prikladnaya teoriya upravleniya bespilotnymi letatel'nymi apparatami. Seriya “Sovremennaya prikladnaya matematika i informatika”. Kazan': GBU “Respublikanskii tsentr monitoringa kachestva obrazovaniya; 2013. 768 s. [Moiseev V.S. Applied theory of control of unmanned aerial vehicles. Series “Modern Applied Mathematics and Informatics”. Kazan: GBU “Republican Center for Monitoring the Quality of Education”; 2013. 768 p. (in Russ.)]
 8. Narovlyanskii G.Ya. Aviatsionnaya klimatologiya. L.: Gidromet. izd-vo; 1968. S. 110–112. [Narovlyanskii G.Ya. Aeronautical climatology. L.: Gidromet. izd-vo; 1968. P. 110–112. (in Russ.)]
 9. Pozdnyakova V.A. Prakticheskaya aviatsionnaya meteorologiya. Ekaterinburg: Ural'skii UTTs GA; 2010. S. 150. [Pozdnyakova V.A. Practical aeronautical meteorology. Ekaterinburg: Ural'skii UTTs GA; 2010. P. 150. (in Russ.)]
 10. Gorbunov A.A., Galimov A.F. Vliyanie meteorologicheskikh faktorov na primenenie i bezopasnost' poleta bespilotnykh letatel'nykh apparatov s bortovym retranslyatorom radiosignala. Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta GPS MChS Rossii. 2016;1:7–15. [Gorbunov A.A., Galimov A.F. Influence of meteorological factors on the use and safety of flight of unmanned aerial vehicles with on-board radio signal transponder. Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta GPSMChSRossii. 2016;1:7–15. (in Russ.)]
 11. Biradar A. S. Wind estimation and effects of wind on waypoint navigation of UAVs. A thesis presented in partial fulfillment of the requirements for the Master of Science degree. Arizona State University. May 2014.
 12. Selecký M., Větra P., Rollo M., Meiser T. Wind corrections in flight path planning. International Journal of Advanced Robotic Systems. 2013;10:1-9.
 13. Stojcsics D., Molnar A. Autonomous takeoff and landing control for small size unmanned aerial vehicles. Computing and Informatics. 2013;32:1117–1130.
 14. Langelaan J.W. Alley N., Neidhoefer J. Wind field estimation for small unmanned aerial vehicles. AIAA guidance, navigation and control conference. Toronto: American Institute of Aeronautics and Astronautics; paper 2010-8177.
 15. Druzhinin V.V., Kontorov D.S., Kontorov M.D. Vvedenie v teoriyu konflikta. M.: Radio i svyaz'; 1989. 288 s. [Druzhinin V.V., Kontorov D.S., Kontorov M.D. Introduction to the theory of conflict. M.: Radio i svyaz'; 1989. 288 p. (in Russ.)]
 16. Tikhonov V.I., Mironov M.A. Markovskie protsessy. M.: Sov. Radio; 1977. [Tikhonov V.I., Mironov M.A. Markov processes. M.: Sov. Radio; 1977. (in Russ.)]
 17. Metodicheskie ukazaniya po primeneniyu bespilotnykh letatel'nykh apparatov dlya obsledovaniya vozdukhnykh liniy elektroperedachi i energeticheskikh ob'ektov. Standart organizatsii PAO “FSK EES” STO 56947007- 29.200.10.235-2016. 2016. [Methodical instructions for the use of unmanned aerial vehicles for the survey of overhead transmission lines and power facilities. The standard of organization of PAO “FSK EES” STO 56947007- 29.200.10.235-2016. 2016. (in Russ.)]
 18. Nadezhnost' i effektivnost' v tekhnike: Spravochnik: V 10 t. T. 3. Effektivnost' tekhnicheskikh sistem. Pod red. V.S. Avduevskogo i dr. M.: Mashinostroenie; 1988. 328 s. [Reliability and efficiency in engineering: Handbook: In 10 vol. V. 3. Efficiency of technical systems. Ed. V.S. Avduevsky et al. M.: Mashinostroenie; 1988. 328 p. (in Russ.)]

18. Nguyen H.T.T., Meleshenko P.A., Semenov M.E., Kuznetsov I.E., Gorlov V.A., Klinskikh A.F. Fresh look at Lorenz-like system. 2016 Progress in Electromagnetic Research Symposium (PIERS), Shanghai; 2016. P. 2255-2259.
19. Potashnik E.L., Kuznetsov A.D. Matematicheskoe modelirovanie oblachnykh protsessov: uchebnoe posobie. Sankt-Peterburg: Izdatel'stvo Rossiiskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta; 2010. 444 s. [Potashnik E.L., Kuznetsov A.D. Mathematical modeling of cloud processes: a tutorial. Sankt-Peterburg: Izdatel'stvo Rossiiskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta; 2010. 444 p. (inRuss.)]
20. Shapovalov V.A., Prodan K.A., Mashukov I.Kh. Modelirovanie parametrov oblakov pri glubokoi konveksii. Doklady Vserossiiskoi konferentsii po fizike oblakov i aktivnym vozdeistviyam na gidrometeorologicheskie protsessy. Nal'chik; 2011. S. 100–108. [Shapovalov V.A., Prodan K.A., Mashukov I.Kh. Modeling of cloud parameters for deep convection. Reports of the All-Russian conference on the physics of clouds and active effects on hydrometeorological processes. Nalchik; 2011. P. 100–108. (in Russ.)]
21. Kogan E.L., Mazin I.P., Sergeev B.N., Khvorost'yanov V.I. Chislennoe modelirovanie oblakov. M.: Gidrometeoizdat; 1984. 186 s. [Kogan E.L., Mazin I.P., Sergeev B.N., Khvorost'yanov V.I. Numerical modeling of clouds. M.: Gidrometeoizdat; 1984. 186 p. (in Russ.)]
22. Rodzhers R.R. Kratkii kurs fiziki oblakov. Pod red. I.P. Mazina. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1979. 231 s. [Rodzhers R.R. A short course in the physics of clouds. Ed. I.P. Mazin. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1979. 231 p. (in Russ.)]
23. Matveev L.T. Fizika atmosfery. Pod red. V.G. Morachevskogo. SPb.: Gidrometeoizdat; 2000. 779 s. [Matveev L.T. Physics of the atmosphere. Ed. V.G. Morachevsky. SPb.: Gidrometeoizdat; 2000. 779 p. (in Russ.)]
24. Kuznetsov I.E., Semenov M.E., Kanishcheva O.I., Meleshenko P.A. On the interaction of electromagnetic waves with charged aerosol particles in atmosphere. 2016 Progress in Electromagnetic Research Symposium (PIERS), Shanghai; 2016. P. 3542-3545, DOI: 10.1109/PIERS.2016.7735367.
25. Marchuk G.I. Metody vychislitel'noi matematiki. M.: Nauka; 1977. 352 s. [Marchuk G.I. Methods of computational mathematics. M.: Nauka; 1977. 352 p. (in Russ.)]
26. Kuznetsov I.E., Strashko O.V., Sitnikov N.M. Dinamicheskaya model' prostranstvenno-vremennogo raspredeleniya meteorologicheskikh parametrov v usloviyakh konvektivno-neustoichivoi atmosfery pri ispol'zovanii izmerenii s BLA. Sbornik trudov 4 TsNII "Modelirovanie parametrov atmosfery v raketno-kosmicheskoi tekhnike". Korolev.2017;135:81-86. [Kuznetsov I.E., Strashko O.V., Sitnikov N.M. Dynamic model of spatiotemporal distribution of meteorological parameters in conditions of convective-unstable atmosphere using measurements with UAV. Proceedings of the 4th CNII "Modeling the parameters of the atmosphere in rocket and space technology". Korolev.2017;135:81-86. (inRuss.)]

Сведения об авторах:

Рогозин Евгений Алексеевич – доктор технических наук, профессор кафедры автоматизированных информационных систем органов внутренних дел.

Мельников Алексей Викторович – научный сотрудник научно-исследовательского центра (образовательных и информационных технологий).

Страшко Олег Викторович – адъюнкт кафедры гидрометеорологического обеспечения.

Кузнецов Илья Евгеньевич – доктор технических наук, доцент, начальник кафедры гидрометеорологического обеспечения.

Information about the authors:

Evgeny A. Rogozin - Dr.Sci. (Technical), Prof., Department of Automated Information Systems.

Aleksey V. Melnikov - Researcher.

Oleg V. Strashko – Adjunct, Department of Hydrometeorological Support.

Илья Е. Kuznetsov – Dr.Sci. (Technical), Prof., Assoc. Prof., Head of the Department of Hydrometeorological Support.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 22.02.2018.

Принята в печать 30.04.2018.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 22.02.2018.

Accepted for publication 30.04.2018.

Для цитирования: Минаева Ю.В. Математическая модель оптимизации иерархических многоуровневых систем производственного типа. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2018;45 (2):140-148. DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-2-140-148

For citation: Minaeva Yu.V. Mathematical model for the optimisation of hierarchical multi-level production systems. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2018;45 (2):140-148. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-2-140-148

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 681.3

DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-2-140-148

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПТИМИЗАЦИИ ИЕРАРХИЧЕСКИХ МНОГОУРОВНЕВЫХ СИСТЕМ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ТИПА

Минаева Ю.В.

Воронежский государственный технический университет,
394026, г. Воронеж, Московский пр-т, 14, Россия,
e-mail: myuvs@yandex.ru

Резюме. Цель. Целью данного исследования является разработка математической модели, предназначенной для комплексного решения различных задач проектирования и реконструкции технологической системы производственного цеха машиностроительного предприятия. **Метод.** Методологической основой моделирования сложных иерархических производств является теория сложных систем и агрегативно-декомпозиционный подход, позволяющий представлять сложную систему в виде совокупности взаимосвязанных подсистем. **Результат.** Разработана математическая модель, предназначенная для комплексного решения задач формирования оптимальной производственной программы, выбора состава оборудования и закрепления операций по обработке за станками по единому для цеха критерию оптимальности. Отличительными особенностями предложенной в статье оптимизационной модели являются возможность ее применения, как для проектирования, так и для реконструкции технологической системы, а также возможность простого масштабирования до необходимого уровня (цеха в целом или отдельного участка). **Вывод.** В статье представлена комплексная математическая модель оптимизации технологической системы по единому для цеха критерию оптимальности, объединяющая решение основных задач проектирования и реконструкции цеха. Использование единого интегрального критерия оптимизации для нескольких задач позволяет учитывать сильные взаимосвязи между отдельными задачами. В основе модели лежит принцип компоновки модели из набора типовых элементов, что позволяет легко получить модели любых комбинаций подзадач, а также их различные варианты. Благодаря многоуровневой унификации и масштабируемости модели, ее использование позволяет повысить эффективность моделирования и оптимизации сложных многономенклатурных производств.

Ключевые слова: оптимальное проектирование, математическое моделирование, иерархические системы, декомпозиция, унификация проектных решений

TECHNICAL SCIENCE
COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT

**MATHEMATICAL MODEL FOR THE OPTIMISATION OF HIERARCHICAL
MULTI-LEVEL PRODUCTION SYSTEMS**

Yulia V. Minaeva

¹Voronezh State Technical University,
14, Moscow Avenue, Voronezh 394026, Russia,
e-mail: myuvs@yandex.ru

Abstract Objectives The aim of the study is to develop a mathematical model for the complex solution of various problems in designing and reconstructing the technological system of a production workshop of a machine-building enterprise. **Methods** Complex system theory and an aggregative decomposition approach are used as the methodological basis for modelling complex hierarchical productions, making it possible to represent a complex system in the form of a set of interconnected sub-systems. **Results** A mathematical model designed for a complex solution of problems associated with the formation of an optimal production programme and selection of equipment was developed. Operative parameters for processing machines according to a single optimisation criterion for the workshop were established. Distinctive features of the optimisation model proposed in the article are the possibility of its application both for design and for the reconstruction of a technological system, as well as the possibility of simple scaling to the required level (i.e. the workshop as a whole or a separate section). **Conclusion** The article presents a complex mathematical model for optimising the technological system based on a single optimisation criterion for the workshop, combining the solution of the main tasks of design and reconstruction of the workshop. The use of a single integral optimisation criterion for several problems allows the strong interrelationships between individual tasks to be taken into account. The model is based on the principle of arranging a model from a set of typical elements, easing the construction of models for any sub-task combinations, as well as their respective options. It is possible to use the model's multi-level unification and scalability to increase modelling efficiency and thus optimise complex multinomenclature productions.

Keywords: optimal design, mathematical modelling, hierarchical systems, decomposition, unification of design solutions

Введение. Современный этап научно-технического прогресса характеризуется увеличением сложности производственных процессов и одновременно высокими требованиями к производственным системам с точки зрения их эффективности и адаптивности к постоянно меняющимся условиям внешнего окружения. К числу основных особенностей функционирования производственных систем в современных условиях относятся [1]:

- неопределенность внешних факторов, оказывающих воздействие на производственный процесс (состояние экономики, политической и социальной сферы и т.д.);
- необходимость оперативного реагирования на изменение внешних условий путем корректировки внутренних параметров системы (номенклатуры выпускаемых изделий, структуры производства, парка оборудования и пр.);
- многоуровневая иерархическая структура производственной системы, связанная, в том числе, с наличием территориально-распределенных подразделений;
- сложность организации производственных процессов, связанная с необходимостью анализа большого числа вариантов возможных решений.

Одним из инструментов поддержки развития сложных многономенклатурных производств является использование автоматизированных средств моделирования и оптимизации производственных процессов.

Методологической основой для описания производственных систем является теория сложных систем, рассматривающая производство как систему, состоящую из большого числа взаимосвязанных элементов, деятельность которых подчиняется глобальным целям [2-3].

Производственная система, состоящая из множества производственных участков и вспомогательных подразделений, как правило, имеет сложную иерархическую структуру, параметры которой определяются сложностью конструкции, номенклатуры выпускаемой продукции и характеристик производственного процесса изготовления [3].

Отдельным классом производственных систем является механосборочное производство, сложность которого обуславливается наличием широкой номенклатуры изделий, большого числа используемых материалов, комплектующих и операций по их обработке, а также разнообразием технологий изготовления изделий и выпускаемого основного и вспомогательного оборудования.

Научная методология технологического проектирования производственных систем в целом и механосборочных производств в частности сформулирована в работах Г.Н. Мельникова [4], В.П. Вороненко, Ю.М. Соломенцева [5-6], М.Е. Егорова [7], Е.Н. Хоботова [8] и др.

Однако если ранее в разрабатываемых проектах закладывалась неизменная структура организации и технологии производственного процесса, а срок службы производственных зданий предусматривал многие годы, то в современных условиях необходимо постоянное усовершенствование производственных систем за счет быстрого внедрения организационных и технологических инноваций и частого изменения номенклатуры выпускаемых изделий. Особое значение придается созданию высокоэффективных автоматизированных производственных участков на базе технического перевооружения и реконструкции действующих производственных систем, перевод их на современное оборудование и внедрение средств автоматизации управления всеми этапами производственного процесса [3].

При проектировании технологических систем подлежат разработке и разрешению экономические, технические и организационные задачи [1, 4-6]. Из-за наличия сильной взаимосвязи между различными классами задач любое техническое решение должно приниматься с учетом экономических и организационных ограничений.

К числу экономических задач относятся: планирование производственной программы, включающей перечень номенклатуры изделий и их количества, определение себестоимости продукции и эффективности затрат, определение размеров основных и оборотных фондов, решение вопросов финансирования и т.д.

К техническим задачам относятся: проектирование технологического процесса обработки сырья и полуфабрикатов, определение требуемого состава основного производственного и вспомогательного оборудования, определение состава и количества рабочих, определение потребного количества сырья и материалов, планировка цехов, компоновка оборудования и вспомогательных устройств на участках цеха.

Организационные задачи включают: построение структуры управления, выбор принципа формирования отдельных подразделений цеха, научную организацию труда, документооборот, организацию служб производства, систему контроля за ходом производства и т.д.

Все перечисленные задачи можно разделить на разные группы в зависимости от их сложности, степени формализации и используемых методов решения.

К числу хорошо формализуемых задач, для которых разработаны эффективные средства решения, не требующие применения методов оптимизации, относятся: определение размеров основных и оборотных фондов, состава и количества рабочих, потребного количества сырья и материалов, организационная структура управления, контроль за ходом производства. Подходы к решению таких задач описаны в [9-10].

Для решения задач, варьируемые параметры которых могут изменяться по случайным законам (например, проектирование технологического процесса обработки сырья и полуфабрикатов), эффективно используются методы имитационного моделирования [8, 11-13].

Постановка задачи. К задачам, для которых наиболее эффективным является применение процедур оптимизации, относятся:

- формирование производственной программы цеха;
- определение состава оборудования участков цеха;
- закрепление операций по обработке деталей за оборудованием.

Для решения перечисленных задач разработано достаточно большое количество оптимизационных моделей [14-16], однако они обладают следующими недостатками:

- задачи проектирования цеха решаются независимо друг от друга и по разным критериям оптимизации, при этом не учитывается обратная связь между задачами;
- предназначены только для проектирования технологической системы и не позволяют проводить ее реконструкцию (частичную замену оборудования).

Следовательно, необходима разработка математической модели, которая будет учитывать взаимное влияние отдельных задач за счет наличия единого для всего цеха критерия оптимизации, и позволит выполнять как проектирование, так и реконструкцию цеха или его отдельных участков.

В результате проведения машинного эксперимента с такой моделью будет получена оптимальная программа производства, рекомендуемый для его реализации состав оборудования и технологические маршруты обработки исходных материалов.

Методы исследования. Обобщенная математическая модель оптимизации технологической системы цеха.

Рассмотрим с точки зрения теории иерархических систем процесс проектирования технологической системы производственного цеха. Обобщенная математическая модель данного процесса объединяет в едином комплексе решение следующих оптимизационных задач [17-18]:

- формирование производственной программы цеха;
- определением состава потребного оборудования;
- закрепление операций по обработке деталей за оборудованием.

Пусть за цехом, состоящим из R участков ($r = 1, 2, \dots, R$), закреплено I наименований деталей ($i = 1, \dots, I$). Технологические процессы изготовления I деталей содержат M операций их обработки ($m = 1, \dots, M$).

Эти операции могут выполняться на различных станках из определенного набора, содержащего J ($j = 1, \dots, J$) моделей, причем m -я операция может обрабатываться не обязательно на всех J моделях станков, а только на подмножестве разрешенных ей моделей станков J_m , соответственно на j -й модели станка может выполняться только ограниченное подмножество операций M_j .

К факторам, ограничивающим подмножество выполняемых операций, относятся назначение и тип станка, а также его рабочие параметры (мощность, производительность и др.).

Введем следующие переменные:

- целочисленные переменные u_{jr} , означающие число станков модели j , которое нужно отвести участку r ;
- булевы переменные s_{mj} , причем $s_{mj} = 1$, если j -я операция выполняется на m -й модели станка, и $s_{mj} = 0$ в противоположном случае.

В качестве критерия оптимальности комплексной модели проектирования (реконструкции) цеха принимается интегральный мультипликативный критерий, представляющий собой векторный функционал

$$\prod_{z=1}^Z k_z f_z \rightarrow \text{ext}, \quad (1)$$

где f_z - частные оптимизационные критерии, k_z - весовые коэффициенты, учитывающие важность частных критериев.

Для задачи формирования производственной программы цеха критерием оптимизации

f_1 является максимальный дисконтированный доход:

$$\left(\sum_{t=1}^T \frac{\sum_{i=1}^I C_{\text{изд.}it} x_{it} - \sum_{j=1}^J C_{\text{мат.}jt} \sum_{i=1}^I x_{it} \sum_{m=1}^M M_{jim}}{(1+r)^t (1+k_{\text{инф}})^t} + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I x_{it} C_{\text{зн}it} \right) \cdot (1-H) \rightarrow \max, \quad (2)$$

где $C_{\text{изд.}it}$ - оптовая цена i -го вида изделий в t -м периоде;

x_{it} - оптимальное количество изделий i -го вида в t -м периоде, которое необходимо определить;

$C_{\text{мат.}jt}$ - стоимость единицы измерения j -го вида ресурса в t -м периоде;

M_{jim} - норма расхода j -го материала на единицу i -го изделия на m -й операции $C_{\text{зн}it}$ - заработная плата производственных рабочих за производство i -го изделия в t -м периоде, r - проектная ставка дисконтирования;

$k_{\text{инф}}$ - общий коэффициент инфляции.

Для задач определения состава потребного оборудования и закрепления операций по обработке деталей за оборудованием критерием f_2 является критерий минимизации приведенных затрат:

$$\sum_{r=1}^R \sum_{j=1}^J \left(C'_j \left(\sum_{m \in M_j} s_{mj} t_{mj} \right) K_j^{\text{пер}} + C''_j y_{jr} + K_j E_n (\max(y_{jr} - \bar{y}_{jr}, 0)) \right) \rightarrow \min, \quad (3)$$

где C'_j - текущие затраты, приходящиеся на 1 ч работы станка вида j , руб.;

t_{mj} - время, необходимое для выполнения годовой программы операций m на станках типа j , ч; C''_j - текущие годовые затраты на амортизацию, ремонт и обслуживание единицы станка j -й модели и приходящейся на нее производственной площади; K_j - капитальные затраты на приобретение и монтаж оборудования, строительство производственных площадей и др., приходящиеся на единицу станка j -й модели, руб; $K_j^{\text{пер}}$ - коэффициент переналадки для станка модели j , учитывающий дополнительное время на переналадку станка; E_n - нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений, \bar{y}_{jr} - число заранее имеющихся на участке r станков модели j .

Предложенный мультипликативный критерий оптимизации позволяет учитывать частные критерии, обладающие качественной разнородностью и различной направленностью воздействия (прямой и обратной) на обобщенный показатель.

Задача ABC имеет следующие ограничения:

1. Минимальный и максимальный объемы производства:

$$x_{it}^{\min} \leq x_{it} \leq x_{it}^{\max}, \quad (4)$$

где x_{it}^{\min} - минимальный объем товаров i -го вида, который необходимо производить в t -м периоде; x_{it}^{\max} - максимальный объем товаров i -го вида, который может быть реализован в t -м периоде на потребительском рынке.

2. Максимальный объем материальных ресурсов

$$\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I x_{it} \sum_{m=1}^M M_{jim} \leq M_{\text{pec.}j}, \quad (5)$$

где $M_{рес. j}$ - объем каждого j -го вида материальных ресурсов, доступный предприятию.

3. На операции m партия деталей может обрабатываться на станках типа j только целиком

$$s_{mj} \in \{0, 1\}, \quad m = 1, \dots, M, \quad j \in J_m. \quad (6)$$

4. Требование обязательности назначения операции одним станком из множества J_m

$$\sum_{j \in J_m} s_{mj} = 1, \quad m = 1, \dots, M; \quad (7)$$

5. Число станков j -й модели на g -м участке должно обеспечить фонд времени $y_{jr} \Phi_j$, достаточный для обработки годовой программы всех операций с деталями, закрепленных за станком этой модели (Φ_j - годовой фонд времени одного станка модели j)

$$y_{jr} = \frac{\left(\sum_{m \in M_{jr}} s_{mj} t_{mj} \right) K_j^{неп}}{\Phi_j}. \quad (8)$$

6. Капитальные затраты ограничены максимально доступным для цеха значением A .

$$\sum_{r=1}^R \sum_{j=1}^J y_{jr} K_j \leq A, \quad (9)$$

7. Число работающих по цеху ограничено максимально возможным значением N

$$\sum_{r=1}^R \sum_{j=1}^J \left(N'_j \left(\sum_{m \in M_{jr}} s_{mj} t_{mj} \right) K_j^{неп} + N''_j y_{jr} \right) \leq N, \quad (10)$$

где N'_j - потребное число производственных рабочих, приходящееся на 1 час работы станка; N''_j - потребное число обслуживающих работающих, приходящееся на единицу станка j -й модели.

8. Ограничение по числу переналадок за определенный промежуток времени на станок j -й модели на g -м участке

$$\frac{\sum_{m \in M_{jr}} s_{mj} \sigma_{mj}}{y_{jr}} \leq d_j, \quad (11)$$

где σ_{mj} - заданная величина, равная 1, если данному s_{mj} соответствует признак отдельной операции, и равная 0 в противном случае, d_j - максимально допустимое число переналадок.

Обсуждение результатов. Таким образом, получена задача нелинейного целочисленного программирования с булевыми переменными, причем она имеет большую размерность, т.к. число участков цехов может достигать 20 и более, а на каждом участке число булевых переменных может достигать нескольких тысяч [17]. Предложенная комплексная иерархическая модель позволяет получить модели любой комбинации подзадач проектирования или реконструкции технологической системы производственного цеха, а также их модификации. Возможные варианты моделей представлены на рис. 1 [4-6]. Для получения модели произвольной подзадачи необходимо произвести редукцию комплексной математической модели путем последовательного отсека ограничений и удаления из целевой функции переменных, соответствующих ненужным задачам.

Модели участка из комплексной модели цеха получаются автоматически при фиксации переменной g путем присвоения ей порядкового номера участка. Если необходимо частичное обновление оборудования, то для каждого участка задается список уже имеющегося

оборудования (переменные \bar{y}_{jr}), при полном обновлении оборудования $\bar{y}_{jr} = 0$.

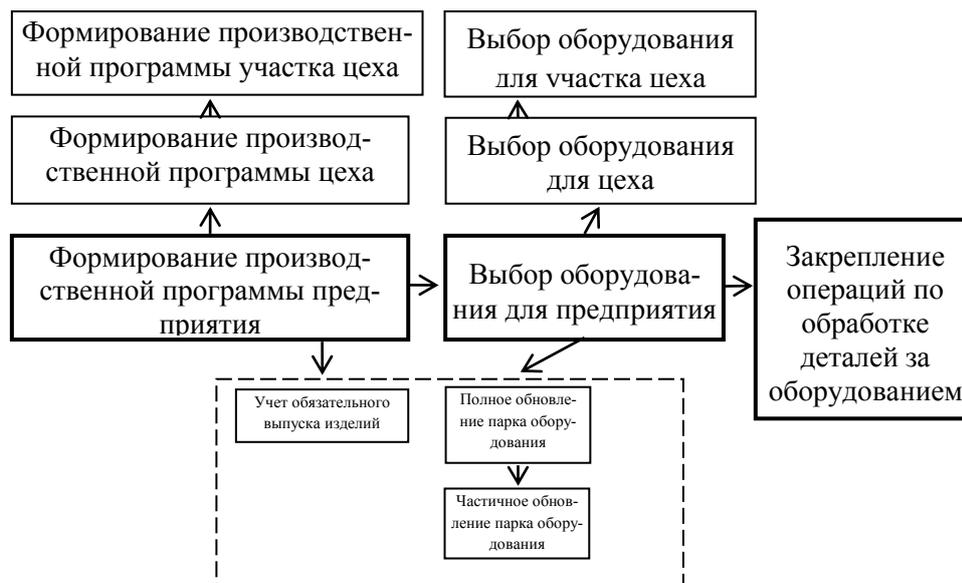


Рис. 1. Структурная схема преобразования типовых процедур проектирования технологической системы

Fig. 1. Block diagram of the conversion of standard procedures for the design of a technological system

Для получения модели произвольной подзадачи необходимо произвести редукцию комплексной математической модели путем последовательного отсекаания ограничений и удаления из целевой функции переменных, соответствующих ненужным задачам.

Модели участка из комплексной модели цеха получаются автоматически при фиксации переменной r путем присвоения ей порядкового номера участка. Если необходимо частичное обновление оборудования, то для каждого участка задается список уже имеющегося оборудования (переменные \bar{y}_{jr}), при полном обновлении оборудования $\bar{y}_{jr} = 0$.

Вывод. В работе представлена комплексная математическая модель оптимизации технологической системы по единому для цеха критерию оптимальности, объединяющая решение основных задач проектирования и реконструкции цеха. В основе модели лежит принцип компоновки модели из набора типовых элементов, что позволяет легко получить модели любых комбинаций подзадач, а также их различные варианты. Благодаря многоуровневой унификации и масштабируемости модели ее использование позволяет повысить эффективность моделирования и оптимизации сложных многономенклатурных производств.

Библиографический список:

1. Белецкая С.Ю. Технология оптимального проектирования развивающихся производственных систем / С.Ю. Белецкая, Н.В. Боковая // Системы управления и информационные технологии: научно-технический журнал. 2008. №2.2 (32). С. 223-226.
2. Месарович М. Теория иерархических многоуровневых систем / М. Месарович, Д. Мако, И. Такахара. М.: Изд-во «Мир», 1973. 343 с.
3. Цвиркун А.Д. Основы синтеза структуры сложных систем / А.Д. Цвиркун. М.: Наука, 1982. 200 с.
4. Мельников Г.Н. Проектирование механосборочных цехов: учебник для студентов машиностроит. спец. вузов / Г.Н. Мельников, В.П. Вороненко. М.: Машиностроение, 1990. 352 с.
5. Проектирование автоматизированных участков и цехов: учеб. для машиностроит. спец. вузов / В.П. Вороненко, В.А. Егоров, М.Г. Косов; под ред. Ю.М. Соломенцева. М.: Высш. шк., 2000. 272 с.
6. Проектирование машиностроительного производства: учебник для вузов / В.П. Вороненко, Ю.М. Соломенцев, А.Г. Схиртладзе; под ред. Ю.М. Соломенцева. – М.: Дрофа, 2006. 380 с.
7. Егоров М.Е. Основы проектирования машиностроительных заводов / М.Е. Егоров. М.: Машиностроение, 1969. 480 с.
8. Хоботов Е. Н. Использование оптимизационно-имитационного подхода для моделирования и

проектирования производственных систем / Е.Н. Хоботов // Автоматика и телемеханика, 1999, № 9, с. 154–161.

9. Радько Т.Н. Экономика предприятия / Т.Н. Радько. М.: КноРус, 2013. 352 с.

10. Экономика предприятия: учебник / В.Я. Горфинкель. М.: ЮНИТИ, 2016. 663 с.

11. Мамиконов А.Г. Проектирование АСУ: учебник для вузов / А.Г. Мамиконов. М.: Высшая школа, 1987. 303 с.

12. Кобелев Н.Б. Основы имитационного моделирования сложных экономических систем / Н. Б. Кобелев. М.: Вузовский учебник, 2015. 139 с.

13. Аксенов К.А. Моделирование и принятие решений в организационно-технических системах: учебное пособие / К.А. Аксенов, Н.В. Гончарова. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2015. 104 с.

14. Кушнер А.А. Производственная программа и ее роль в системе внутрифирменного планирования промышленного предприятия / А.А. Кушнер // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Экономика, 2013, №2. с. 89-94.

15. Мухин О.И. Модели и задачи оптимального управления движением материальных потоков на структурно-перестраиваемых технологических линиях дискретного производства / О.И. Мухин // Системы управления и информационные технологии, 2006, № 3.1. с. 170-174.

16. Минаева Ю.В. Математическая модель выбора состава оборудования при проектировании производственных цехов / Ю.В. Минаева, С.Ю. Белецкая, Н.В. Боковая // Вестник Воронежского государственного технического университета, 2010, Том 6, №1. с. 41-42.

17. Тетерин Г.П. Математические модели и методы решения задач оптимального технологического проектирования механических цехов / Тетерин Г.П., Авербах С.А. // Экономика и математические методы, 1988, том XXIV, вып. 1, с. 82-93.

18. Минаева Ю.В. Математические модели оптимального проектирования механических цехов / Минаева Ю.В., Белецкая С.Ю., Боковая Н.В. // Вестник Воронежского государственного технического университета, 2008, том 4, №12, с. 21-23.

References:

1. Beletskaya S.Yu., Bokovaya N.V. Tekhnologiya optimal'nogo proektirovaniya razvivayushchikhsya proizvodstvennykh sistem. Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii. 2008;2.2(32):223-226. [Beletskaya S.Yu., Bokovaya N.V. The technology of optimal design of developing production systems. Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii. 2008;2.2(32):223-226. (in Russ.)]
2. Mesarovich M., Mako D., Takakhara I. Teoriya ierarkhicheskikh mnogourovnevnykh sistem. M.: Izd-vo "Mir"; 1973. 343 s. [Mesarovich M., Mako D., Takakhara I. Theory of hierarchical multi-level systems. M.: Izd-vo "Mir"; 1973. 343 p. (in Russ.)]
3. Tsvirkun A.D. Osnovy sinteza struktury slozhnykh sistem. M.: Nauka; 1982. 200 s. [Tsvirkun A.D. Fundamentals of structural synthesis of complex systems. M.: Nauka; 1982. 200 p. (in Russ.)]
4. Mel'nikov G.N., Voronenko V.P. Proektirovanie mekhanosborochnykh tsekhov: uchebnik dlya studentov mashinostroit. spets. vuzov. M.: Mashinostroenie; 1990. 352 s. [Mel'nikov G.N., Voronenko V.P. Designing machine assembly workshops: a textbook for students of machine building institutions. M.: Mashinostroenie; 1990. 352 p. (in Russ.)]
5. Voronenko V.P., Egorov V.A., Kosov M.G. Proektirovanie avtomatizirovannykh uchastkov i tsekhov: ucheb. dlya mashinostroit. spets. vuzov. Pod red. Yu.M. Solomentseva. M.: Vyssh. shk.; 2000. 272 s. [Voronenko V.P., Egorov V.A., Kosov M.G. Designing of automated sections and workshops: a tutorial for machine building institutions. Ed. Yu.M. Solomentsev. M.: Vyssh. shk.; 2000. 272 p. (in Russ.)]
6. Voronenko V.P., Solomentsev Yu.M., Skhirtladze A.G. Proektirovanie mashinostroitelnogo proizvodstva: uchebnik dlya vuzov. Pod red. Yu.M. Solomentseva. M.: Drofa; 2006. 380 s. [Voronenko V.P., Solomentsev Yu.M., Skhirtladze A.G. Designing of machine-building production: textbook for high schools. Ed. Yu.M. Solomentsev. M.: Drofa; 2006. 380 p. (in Russ.)]
7. Egorov M.E. Osnovy proektirovaniya mashinostroitel'nykh zavodov. M.: Mashinostroenie; 1969. 480 s. [Egorov M.E. Fundamentals of designing machine-building plants. M.: Mashinostroenie; 1969. 480 p. (in Russ.)]
8. Khobotov E.N. Ispol'zovanie optimizatsionno-imitatsionnogo podkhoda dlya modelirovaniyaiproektirovaniyaproizvodstvennykh sistem. Avtomatika i telemekhanika. 1999;9:154–161. [Khobotov E.N. Use of the optimisation-simulation approach for modeling and design of production systems. Automation and Remote Control. 1999;9:154–161. (in Russ.)]
9. Rad'ko T.N. Ekonomika predpriyatiya. M.: KnoРус; 2013. 352 s. [Rad'ko T.N. Enterprise economics. M.: KnoРус; 2013. 352 p. (in Russ.)]

10. Gorfinkel' V.Ya. *Ekonomika predpriyatiya: uchebnik*. M.: YuNITI; 2016. 663 s. [Gorfinkel' V.Ya. *Enterprise economics: a textbook*. M.: YuNITI; 2016. 663 p. (in Russ.)]
11. Mamikonov A.G. *Proektirovanie ASU: uchebnik dlya vuzov*. M.: Vysshaya shkola; 1987. 303 s. [Mamikonov A.G. *Designing of ICS: textbook for universities*. M.: Vysshaya shkola; 1987. 303 p. (in Russ.)]
12. Kobelev N.B. *Osnovy imitatsionnogo modelirovaniya slozhnykh ekonomicheskikh sistem*. M.: Vuzovskii uchebnik; 2015. 139 s. [Kobelev N.B. *Fundamentals of simulation of complex economic systems*. M.: Vuzovskii uchebnik; 2015. 139 p. (in Russ.)]
13. Aksenov K.A., Goncharova N.V. *Modelirovanie i prinyatie reshenii v organizatsionno-tekhnicheskikh sistemakh: uchebnoe posobie*. Ekaterinburg: Izd-vo Ural. un-ta; 2015. 104 s. [Aksenov K.A., Goncharova N.V. *Modeling and decision making in organisational and technical systems: a tutorial*. Ekaterinburg: Izd-vo Ural. un-ta; 2015. 104 p. (in Russ.)]
14. Kushner A.A. *Proizvodstvennaya programma i ee rol' v sisteme vnutrifirmennogo planirovaniya promyshlennogo predpriyatiya*. Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Ekonomika. 2013;2:89-94. [Kushner A.A. *The production program and its role in the system of intra-firm planning of an industrial enterprise*. Vestnik of the Astrakhan State Technical University. Series: Economics. 2013;2:89-94. (in Russ.)]
15. Mukhin O.I. *Modeli i zadachi optimal'nogo upravleniya dvizheniem material'nykh potokov na strukturno-perestraivaemykh tekhnologicheskikh liniyakh diskretnogo proizvodstva. Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii*. 2006;3(1):170-174. [Mukhin O.I. *Models and problems of optimal control over the movement of material flows on structurally-tunable technological lines of discrete production. Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii*. 2006;3(1):170-174. (in Russ.)]
16. Minaeva Yu.V., Beletskaya S.Yu., Bokovaya N.V. *Matematicheskaya model' vybora sostava oborudovaniya pri proektirovanii proizvodstvennykh tsekhov*. Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2010;6(1):41-42. [Minaeva Yu.V., Beletskaya S.Yu., Bokovaya N.V. *Mathematical model of choosing the equipment composition in the design of production workshops*. Bulletin of Voronezh State Technical University. 2010;6(1):41-42. (in Russ.)]
17. Teterin G.P., Averbakh S.A. *Matematicheskie modeli i metody resheniya zadach optimal'nogo tekhnologicheskogo proektirovaniya mekhanicheskikh tsekhov*. Ekonomika i matematicheskie metody. 1988;XXIV(1):82-93. [Teterin G.P., Averbakh S.A. *Mathematical models and methods for solving problems of optimal technological design of mechanical workshops*. Economics and Mathematical Methods. 1988;XXIV(1):82-93. (in Russ.)]
18. Minaeva Yu.V., Beletskaya S.Yu., Bokovaya N.V. *Matematicheskie modeli optimal'nogo proektirovaniya mekhanicheskikh tsekhov*. Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2008;4(12):21-23. [Minaeva Yu.V., Beletskaya S.Yu., Bokovaya N.V. *Mathematical models of optimal design of mechanical shops*. Bulletin of Voronezh State Technical University. 2008;4(12):21-23. (in Russ.)]

Сведения об авторе:

Минаева Юлия Васильевна - старший преподаватель кафедры систем автоматизированного проектирования и информационных систем.

Information about the author.

Yulia V. Minaeva - Senior Lecturer, Department of Computer Aided Design and Information Systems.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 12.03.2018.

Принята в печать 30.04.2018.

Conflict of interest.

The author declare no conflict of interest.

Received 12.03.2018.

Accepted for publication 30.04.2018.

Для цитирования: Михитаров А.Р., Савич В.Л., Хегай В.К. К вопросу оптимизации динамических характеристик виброкорчевальной машины. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2018;45 (2):149-157. DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-2-149-157

For citation: Mikhitarov A.R., Savich V.L., Khagai V.K. To the question of optimising the dynamic characteristics of a vibrational tree uprooting machine. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2018; 45 (2):149-157. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-2-149-157

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 550.34.01

DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-2-149-157

К ВОПРОСУ ОПТИМИЗАЦИИ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИБРОКОРЧЕВАЛЬНОЙ МАШИНЫ

Михитаров А.Р.³ Савич В.Л.², Хегай В.К.¹,

¹⁻³ Ухтинский государственный технический университет,

¹⁻³ 169300, г. Ухта, ул. Первомайская, 13, Россия,

¹e-mail: khagaivk@gmail.com, ²e-mail: vsavitch@yandex.ru, ³e-mail: mkrth@yandex.ru

Резюме. Цель. После лесосечных работ в лесу остаются пни, которые выкорчевываются специальными машинами при проведении лесохозяйственных работ, то есть, для корчевки пней приходится вторично «загонять» на лесные делянки тяжелую технику, разрушая повторно почвенную среду и подрост, что приводит не только к эрозии почвы, но и не малым финансовым затратам. Несомненный интерес представляют машины, которые будут совмещать операции рубки (валки) леса и корчевки пней, то есть, выкорчевывать деревья вместе с корнями. Как показали исследования, основными недостатками применения такой технологии «стандартными» лесосечными или лесохозяйственными машинами являются их избыточная нагруженность и энергоемкость. Одним из направлений устранения этих недостатков является применение вибрации. **Метод.** В статье рассматриваются вопросы эффективности применения вибрации, в частности, крутильных колебаний, при корчевании деревьев вместе с корнями. Для решения задачи разработана математическая модель системы «машина – дерево – почвенно-корневая система», учитывающая взаимное влияние динамических характеристик технологического оборудования машины, дерева и почвенно-корневой системы, позволяющая методом (путем) анализа амплитудно-частотных характеристик заданной системы выбрать рациональный (оптимальный) диапазон частот работы вибрационной техники. Для реализации метода анализа амплитудно-частотных характеристик механической системы использовалось уравнение Лагранжа второго рода. **Результат.** На основе математической модели системы «машина – дерево – почвенно-корневая система (ПКС)» и анализа амплитудно-частотных характеристик заданной системы определяется рациональный диапазон частот работы вибрационной техники. Работа вибрационной техники в заданном диапазоне частот, как показал анализ, позволяет значительно снизить динамическую нагруженность машины и в то же время создать условия для эффективного разрушения почвенно-корневой системы. **Вывод.** Предложенная методика позволяет для каждого расчетного дерева в зависимости от типа почвы и базовой машины найти рациональные значения частотной характеристики вибрационной техники.

Ключевые слова: крутильные колебания, амплитудно-частотная характеристика, частота и фаза колебаний, корчевальная машина, корчевание деревьев, диапазон частот, оптимальный и рациональный выбор параметров системы

TECHNICAL SCIENCE
COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT

TO THE QUESTION OF OPTIMISING THE DYNAMIC CHARACTERISTICS OF A VIBRATIONAL TREE UPROOTING MACHINE

Valery K. Khegai¹, Vasily L. Savich², Aleksander R. Mikhitarov³

¹⁻³Ukhta State Technical University,

¹⁻³13, Pervomayskaya Str., Ukhta 169300, Russia

¹e-mail: khegaivk@gmail.com, ²e-mail: vsavitch@yandex.ru, ³e-mail: mkrth@yandex.ru

Abstract Objectives Following logging operations, tree stumps remain in the site of the former forest. While these may be uprooted by special machines in the course of forestry operations, the use of heavy forestry machines operated repeatedly on the forest sites not only lead to soil erosion, but also to considerable financial expense. Consequently, the development of machines combining cutting (logging) and uprooting operations – that is, uprooting the trees along with their roots – are of a great interest. As research has shown, the main disadvantages of the use of such technology by “conventional” logging or forestry machines are their excessive loading and energy intensity. The aim of the research is to investigate means of eliminating these drawbacks by using vibration. **Methods** The article deals with the problem of ensuring the effectiveness of the vibration application – in particular, torsional vibrations, used to stub trees together with their roots. To solve this problem, a mathematical model of the “machine-tree-soil-root system” system was developed, which takes into account the mutual influence of the dynamic characteristics of the machine’s technological equipment and tree and soil-root system, which allows a rational (optimal) frequency range of vibration equipment to be selected by analysing the amplitude-frequency characteristics of a given system. To analyse the amplitude-frequency characteristics of a mechanical system, the Euler-Lagrange equations were used. **Results** Based on the mathematical model of the “machine-tree-soil-root system (SRS)” system and an analysis of the amplitude-frequency characteristics of a given system, a rational range of vibration frequencies was determined. As shown by analysis, the work of vibrational equipment in a given frequency range can significantly reduce the dynamic loading of the machine and at the same time create appropriate conditions for the effective destruction of the soil-root system. **Conclusion** The proposed method allows the rational values of the frequency characteristic of vibration equipment for each calculated tree to be found depending on the soil type and the basic machine.

Keywords: torsional vibrations, amplitude-frequency response, frequency and phase of vibrations, tree uprooting machine, tree stubbing, frequency range, optimal and rational choice of system parameters

Введение. После рубки леса валочно-пакетирующими машинами на лесных площадях остаются пни, которые при проведении лесохозяйственных работ убираются специальными корчевальными машинами. Такая раздельная технология лесных работ приводит к дополнительным затратам и ухудшению экологии в лесу (дважды уничтожается подрост и разрушается почва).

В связи с вышесказанным несомненный интерес представляют машины, которые будут совмещать операции рубки леса и корчевки пней, то есть выдергивать деревья с корневой системой с последующим ее отделением.

О перспективности применения таких машин были посвящены работы известных ученых и инженеров [1-9].

Как показали исследования [1-4, 9], корчевка деревьев вместе с корнями или отдельно пней чисто силовыми методами (статическое выдергивание или разрушение корневой системы бульдозером) требует применения мощных энергоемких машин.

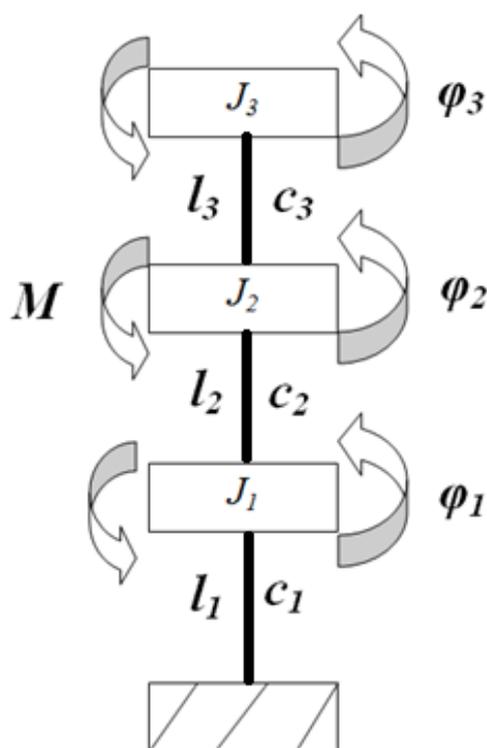
Постановка задачи. Альтернативным решением может быть применение вибрацион-

ной техники. Это позволит значительно снизить нагрузку на технологическое оборудование, а, следовательно, и энергоёмкость машины в целом. При этом следует иметь в виду, что применение вибрационной техники может привести к обратному эффекту – значительному возрастанию динамических нагрузок [10-13]. Помимо этого, необходимо учитывать и собственные частоты рассматриваемых объектов, в частности, в работах [17-18] были установлены методы определения собственных частот стержневых систем с древовидной структурой.

Методы исследования. Решение проблемы снижения нагрузок за счет вибрации связано с задачей оптимизации виброхарактеристик в системе «машина–дерево – почвенно-корневая система».

В работах [9, 14-16] были рассмотрены вопросы оптимизации виброхарактеристик вышеупомянутой системы при продольных колебаниях ствола дерева. Теперь рассмотрим случай применения крутильных колебаний.

Для исследования этой задачи рассмотрим следующую расчетную схему (рис.1).



J_1, J_2, J_3 – соответственно приведенные моменты инерций ПКС, технологического оборудования и дерева;

J_1, J_2, J_3 - respectively, the reduced moments of inertia of the PKS, technological equipment and wood;

c_1, c_2, c_3 – соответственно приведенные коэффициенты жесткости на кручение участков ПКС, технологического оборудования и ствола дерева;

c_1, c_2, c_3 - respectively, the reduced stiffness coefficients for torsion of the PKS sections, the process equipment and the tree trunk

l_1 – глубина ПКС;

l_1 – is the PKS depth;

l_2 – длина части дерева от поверхности земли до точки контакта с технологическим оборудованием (ТО);

l_2 – is the length of the part of the tree from the surface of the earth to the point of contact with the technological equipment (TO);

l_3 – длина части ствола дерева от точки контакта с ТО до центра тяжести дерева;

l_3 is the length of the part of the tree trunk from the point of contact with the TO to the center of gravity of the tree;

$\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ – обобщенные координаты системы; *generalized system coordinates*

$M = M_0 \sin(pt + \delta)$ – возмущающий крутящий момент, действующий на технологическое оборудование; *disturbing torque acting on the process equipment;*

M_0 – максимальный возмущающий момент;

p – циклическая частота возмущающего момента; *maximum disturbing moment*

δ – начальная фаза возмущающего момента; *initial phase of disturbing moment*

Рис.1. Расчетная схема

Fig.1. Design scheme

Рассматриваемая система имеет три степени свободы. За обобщенные координаты системы примем углы поворота дисков $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$.

Кинетическую и потенциальную энергии заданной системы определяем из уравнений [11, 19-21]

$$\left. \begin{aligned} T &= \frac{1}{2}(J_1\dot{\varphi}_1^2 + \frac{1}{2}J_2\dot{\varphi}_2^2 + \frac{1}{2}J_3\dot{\varphi}_3^2); \\ \Pi &= \frac{1}{2}c_1\varphi_1^2 + \frac{1}{2}c_2(\varphi_2 - \varphi_1)^2 + \frac{1}{2}c_3(\varphi_3 - \varphi_2)^2. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Подставим значения Т и П в уравнения Лагранжа II-го рода [11, 19-21].

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}_i}\right) - \frac{\partial T}{\partial \varphi_i} = -\frac{\partial \Pi}{\partial \varphi_i} + Q_i, \quad i=1,2,3, \quad (2)$$

где Q_i – обобщенная сила, соответствующая φ_i обобщенной координате. В результате имеем:

$$\left. \begin{aligned} J_1\ddot{\varphi}_1 + (c_1 + c_2)\varphi_1 - c_2\varphi_2 &= 0; \\ J_2\ddot{\varphi}_2 - c_2\varphi_1 + (c_2 + c_3)\varphi_2 - c_3\varphi_3 &= M_0 \sin(pt + \delta); \\ J_3\ddot{\varphi}_3 - c_3\varphi_2 + c_3\varphi_3 &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Общий интеграл системы дифференциальных уравнений (3) является суммой общего решения однородной системы и частного решения неоднородной системы, то есть

$$\varphi_i = \varphi_i^* + \varphi_i^{**}, \quad i=1,2,3. \quad (4)$$

Первое решение φ_i^* определяет свободные колебания системы. Так как свободные колебания системы при наличии сопротивлений быстро затухают, то практический интерес представляет лишь частное решение φ_i^{**} , определяющее вынужденные колебания системы.

Частное решение будем искать в виде:

$$\varphi_i^{**} = A_{i6} \sin(pt + \delta), \quad i=1,2,3, \quad (5)$$

предположив, что координаты φ_i ($i=1,2,3$) изменяются по гармоническому закону.

Для определения неизвестных постоянных A_{i6} подставим (4) в (3). После сокращения $\sin(pt + \delta)$ и несложных математических преобразований получим следующую систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} (c_1 + c_2 - J_1 p^2)A_1 - c_2 A_2 &= 0; \\ -c_2 A_1 + (c_2 + c_3 - J_2 p^2)A_2 - c_3 A_3 &= M_0; \\ -c_3 A_2 + (c_3 - J_3 p^2)A_3 &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

В уравнениях (5) неизвестными являются амплитуды вынужденных колебаний A_{i6} ($i=1,2,3$).

Решение системы линейных уравнений (5) относительно A_{i6} дает:

$$\left. \begin{aligned} A_{16} &= \frac{m_0}{\Delta'(p^2)} \omega_{12}^2 (p^2 - \omega_{33}^2); \\ A_{26} &= \frac{m_0}{\Delta'(p^2)} (p^2 - \omega_{33}^2)(\omega_{11}^2 + \omega_{12}^2 - p^2); \\ A_{36} &= \frac{m_0}{\Delta'(p^2)} \omega_{33}^2 (p^2 - \omega_{11}^2 - \omega_{12}^2), \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

где

$$\begin{cases} \omega_{11}^2 = \frac{c_1}{J_1}; & \omega_{22}^2 = \frac{c_2}{J_2}; & \omega_{33}^2 = \frac{c_3}{J_3}; \\ \omega_{12}^2 = \frac{c_2}{J_1}; & \omega_{13}^2 = \frac{c_3}{J_1}; & \omega_{23}^2 = \frac{c_3}{J_2}; \\ m_0 = \frac{M_0}{J_2}; \end{cases}$$

$$\Delta'(p^2) = p^6 - p^4(\omega_{11}^2 + \omega_{22}^2 + \omega_{33}^2 + \omega_{12}^2 + \omega_{23}^2) + p^2(\omega_{11}^2\omega_{22}^2 + \omega_{11}^2\omega_{33}^2 + \omega_{22}^2\omega_{33}^2 + \omega_{11}^2\omega_{23}^2 + \omega_{22}^2\omega_{13}^2 + \omega_{33}^2\omega_{12}^2) - \omega_{11}^2\omega_{22}^2\omega_{33}^2.$$

Таким образом, уравнения вынужденных крутильных колебаний системы «машина – дерево – ПКС» в соответствии с (5), (6) и (7) запишутся в виде:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_1 &= \frac{m_0}{\Delta'(p^2)} \omega_{12}^2 (p^2 - \omega_{33}^2) \sin(pt + \delta); \\ \varphi_2 &= \frac{m_0}{\Delta'(p^2)} (p^2 - \omega_{33}^2) (\omega_{11}^2 + \omega_{12}^2 - p^2) \sin(pt + \delta); \\ \varphi_3 &= \frac{m_0}{\Delta'(p^2)} \omega_{33}^2 (p^2 - \omega_{11}^2 - \omega_{12}^2) \sin(pt + \delta). \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Из анализа уравнений (6) и (7) и (8) следует, что при выполнении условия

$$p^{*2} = p^2 = \omega_{11}^2 + \omega_{12}^2 = \frac{c_1 + c_2}{J_1}, \quad (9)$$

объекты системы с моментами инерций J_2 и J_3 не совершают вынужденные крутильные колебания, а объект с моментом инерции J_1 совершает вынужденные колебания с частотой p^* возмущающего момента. При этом амплитуда вынужденных крутильных колебаний этого объекта определяется первой формулой системы (6).

С точки зрения динамики машины оптимальным вариантом подбора частоты возмущения крутильных колебаний является условие, отвечающее требованиям формулы (9). В этом случае вынужденные колебания совершает лишь ПКС, тогда как машина и ствол дерева с технологическим оборудованием совершают свободные колебания. Это означает, что вся энергия вибратора направлена на колебания ПКС, способствуя ее разрушению. Однако, остается открытым вопрос – насколько при этом будет эффективно происходить разрушение ПКС.

Для ответа на поставленный вопрос необходимо произвести анализ амплитудно-частотных характеристик изучаемой механической системы при крутильных колебаниях.

Обсуждение результатов. Анализ произведем для расчетного дерева с объемом 0,5 м³, тип почвы «кисличный». В качестве базовой машины примем валочно-пакетирующую машину ЛП-19.

Примем следующие расчетные данные: $J_1 = 40,78$ кг·м²; $J_2 = 22,95$ кг·м²; $J_3 = 4,95$ кг·м²; $c_1 = 2 \cdot 10^4$ Н·м; $c_2 = 4,59 \cdot 10^5$ Н·м; $c_3 = 3,5 \cdot 10^4$ Н·м.

Рассмотрим поведение системы на четырех интервалах изменения циклической частоты возмущающего момента:

$$0 \leq p \leq p_1, \quad p_1 < p \leq p_2, \quad p_2 < p \leq p_3, \quad p_3 < p < \infty, \quad (10)$$

здесь p_1, p_2, p_3 – резонансные частоты крутильных колебаний системы «машина – дерево – ПКС», которые определяются из уравнения частот

$$p^6 - p^4(\omega_{11}^2 + \omega_{22}^2 + \omega_{33}^2 + \omega_{12}^2 + \omega_{23}^2) + p^2(\omega_{11}^2\omega_{22}^2 + \omega_{11}^2\omega_{33}^2 + \omega_{22}^2\omega_{33}^2 + \omega_{11}^2\omega_{23}^2 + \omega_{22}^2\omega_{13}^2 + \omega_{33}^2\omega_{12}^2) - \omega_{11}^2\omega_{22}^2\omega_{33}^2 = 0. \quad (11)$$

Корни кубического уравнения (11) относительно p^2 определяют резонансные частоты $p_1,$

p_2 , p_3 . В рассматриваемом случае они соответственно равны $p_1=20,75 \text{ c}^{-1}$, $p_2=87,04 \text{ c}^{-1}$, $p_3=145,54 \text{ c}^{-1}$.

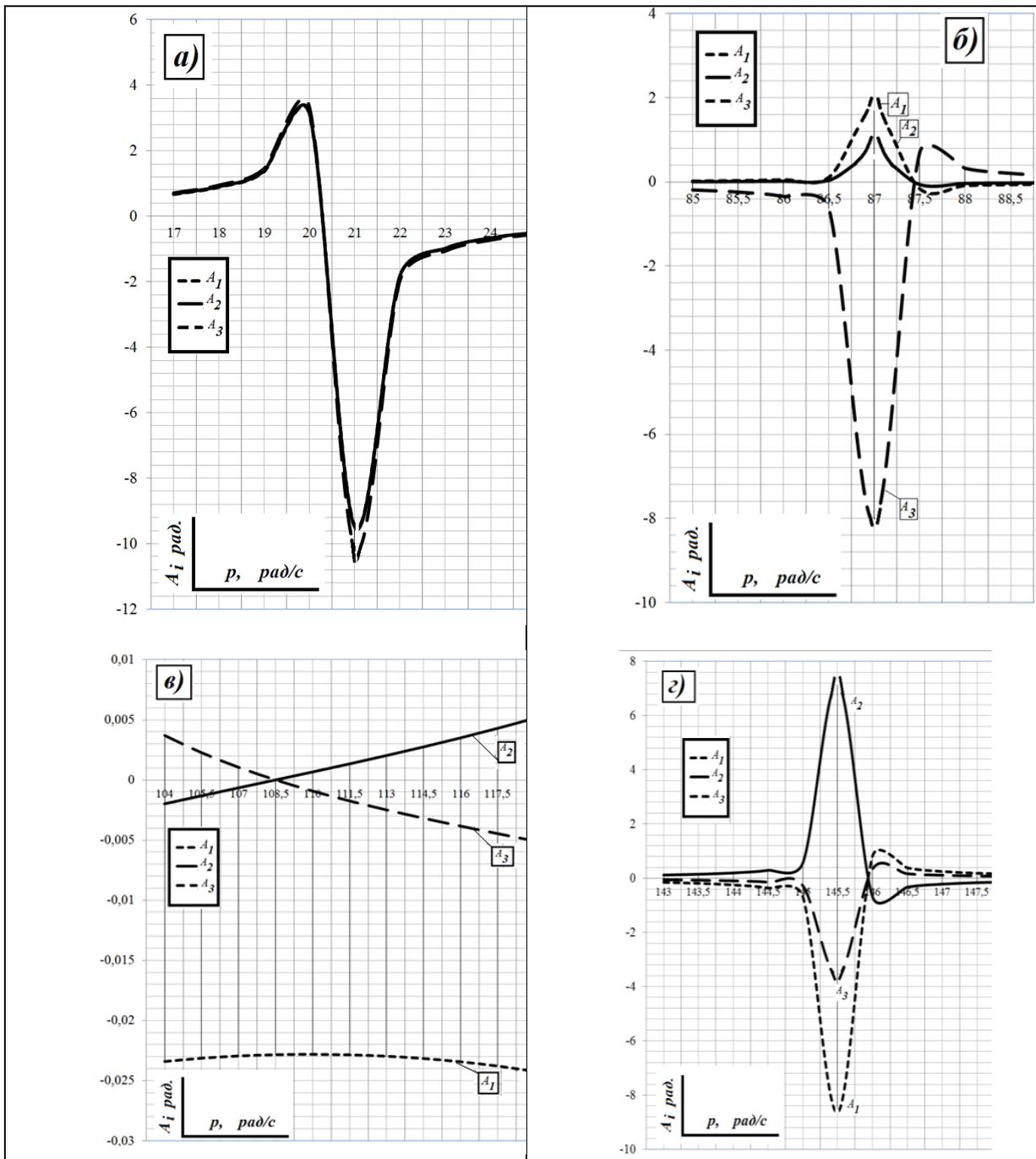


Рис. 2. Амплитудно-частотные характеристики механической системы

Fig. 2. Amplitude-frequency characteristics of the mechanical system

В интервале $[0, p_1)$ все три диска с моментами инерции J_1, J_2, J_3 колеблются синфазно с возмущающим моментом M . С ростом величины p амплитуды $A_{i\delta}$ ($i=1, 2, 3$) возрастают. При $p=p_1$ в системе наступает первый резонанс и функции $A_{i\delta}$ претерпевают бесконечный разрыв (рис. 2а).

На этом интервале, с точки зрения динамики, нет оптимального решения, так как все объекты системы колеблются в сопоставимых величинах, в том числе и объект с моментом инерции J_2 , характеризующий технологическое оборудование машины, что нежелательно.

В интервале $(p_1; p_2)$ все три диска, до некоторого значения $p=p_k$, колеблются в противофазе с возмущающим моментом M . При $p>p_k$ диски с моментами инерции J_1, J_2 уже колеблют-

ся синфазно с возмущающим моментом, а объект с моментом инерции J_3 продолжает колебаться в противофазе с моментом M . Амплитуды $A_{i\theta}$ в интервале $(p_1; p_k]$ убывают по абсолютной величине. При $p=p_2$ в системе возникает второй резонанс, и функции $A_{i\theta}$ снова претерпевают бесконечный разрыв (рис.2, б).

На интервале $(p_1; p_2)$ также нет оптимального решения, так амплитуды $A_{i\theta}$ в диапазоне $(p_1; p_k)$ сопоставимы по величине, а в интервале $(p_k; p_2)$ амплитуды $A_{1\theta}$ и $A_{2\theta}$ весьма незначительны, а $A_{3\theta}$ возрастает по абсолютной величине.

В интервале $(p_2; p_3)$ до значения $p = p^*$, которое находится из формулы (9), диски с моментами инерции J_1, J_2 колеблются в противофазе с возмущающим моментом M , а объект с J_3 – в противофазе с возмущающим моментом.

Все три амплитуды $A_{1\theta}, A_{2\theta}, A_{3\theta}$ с ростом p до значения $p = p^*$, то есть $p \in (p_2; p^*]$ уменьшаются по абсолютной величине. При $p = p^* A_{2\theta} = A_{3\theta} = 0$, а $A_{1\theta} = 0,0228$ рад. При дальнейшем увеличении p , то есть $p \in (p^*; p_3)$ амплитуды $A_{i\theta}$ возрастают по абсолютной величине (рис.2, в).

При $p=p_3$ в системе наступает третий резонанс и функции $A_{i\theta}$ снова претерпевают бесконечный разрыв (рис.2, г).

В интервале $(p_3; \infty)$ все три амплитуды $A_{i\theta}$ с ростом p вначале колеблются в сопоставимых абсолютных величинах, а затем асимптотически приближаются к нулю (рис.2, г). Следовательно, на этом интервале также нет оптимального решения.

Вывод. Таким образом, из проделанного анализа следует, что оптимальное решение находится в интервале $(p_2; p_3)$. Этим оптимальным решением является случай, когда $p=p^*$, значение которой определяется из равенства (9)

$$p^* = \sqrt{\frac{c_1 + c_2}{J_1}} \quad (12)$$

Для принятых параметров рассматриваемой системы имеем:

$$p^* = 108,5 \text{ с}^{-1}; A_{2\theta} = 0; A_{3\theta} = 0; A_{1\theta} = 0,0228 \text{ рад.},$$

то есть при соблюдении условия (12) вынужденные колебания совершает только диск с моментом инерции J_1 , характеризующий почвенно-корневую систему, а объекты с моментами инерции J_2 и J_3 совершают лишь свободные крутильные колебания

Имея в виду, что в интервале $[104; 118] \text{ с}^{-1}$ (рис. 2, в) амплитуды $A_{2\theta}$ и $A_{3\theta}$ несопоставимо малы по сравнению с $A_{1\theta}$ по абсолютной величине можно принять этот диапазон рациональным. Так, в этом диапазоне частот амплитуда $A_{1\theta}$ превышает $A_{2\theta}$ и $A_{3\theta}$ в среднем 4 и более раз, то есть

$$A_{2\theta} \ll A_{1\theta} \geq A_{3\theta}. \quad (13)$$

Предложенная методика позволяет для каждого расчетного дерева в зависимости от типа почвы и базовой машины найти рациональные значения частотной характеристики вибрационной техники.

Библиографический список:

1. Албьяков, М.П. Справочник механизатора лесного хозяйства [Текст] / М.П. Албьяков, Г.П. Ильин, Г.Б. Климов и др. – изд. 2-е, доп. и перераб. - М.: Лесная пром-сть, 1977 г. - 296 с.
2. Шегельман, И.Р. Исследование процесса механизированной заготовки пней древесины [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / И.Р. Шегельман, Петрозаводск, 1978 – 205 с.
3. Зима, И.М. Механизация сельскохозяйственных работ [Текст] / И.М. Зима, Т.Т. Малютин / 2-е изд. – М.: Лесн. промышленность, 1964. 550 с.
4. Египко, С.В. Технология корчевания одиночных пней комбинированным рабочим органом [Текст]: дис. ... канд. техн. наук. / С.В. Египко. - Новочеркасск, 2007. 212 с.
5. Пат. 2001132729/12 РФ, 00/00040 НУ. Устройство для валки деревьев вместе с корнями (варианты) / ТрефанЛайош, ТрефанСаболч, ТрефанСилард // Бюл. -2005. - № 11.
6. Пат. 2005110586/12 РФ. Устройство для корчевания пней / И.М. Бартенев, М.В. Драпалюк, В.И. Посметьев, В.В. Чмелев // Бюл. – 2006. - № 36
7. Пат. 2007142842/12 РФ. Способ комбинированного корчевания пней / С.В. Египко // Бюл. - 2009. - № 24.

8. А.с. 406513 МПК 23/08 СССР Машина для заготовки деревьев с корнями / Шегельман И.Р. // Бюл. – 1973. - № 46.
9. Савич, В.Л. Обоснование параметров оборудования для виброкорчевки пней и целых деревьев [Текст]: дис. ... канд. техн. наук. /В.Л. Савич. - Ухта, 2012. 188 с.
10. Александров, В.А. Конструирование и расчет машин и оборудования для лесосечных работ и нижних складов [Текст]: учебник /В.А. Александров, Н.Р. Шоль. – Ухта: УГТУ, 2002 г. – 244 с.
11. Сурьянинов, Н.Г. Теоретические основы динамики машин [Текст]: учебное пособие / Н.Г. Сурьянинов, А.Ф. Дашенко, П.А. Белоус. – Одесса: ОГПУ, 2000 г. – 302 с.
12. Магнус, К. Колебания: Введение в исследование колебательных систем[Текст] /К. Магнус.- пер. с нем. – М.: Мир, 1982. – 304 с.
13. Pain H. J. The physics of vibration and waves. John Willey and sons, LTD, London, New York, Sydney, Toronto, 1976.
14. Хегай, В.К. О выборе оптимальных параметров виброкорчевальной машины [Текст] /В.К. Хегай, В.Л. Савич, А.Р. Михитаров – Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2015. - № 213. – С. 173-183
15. Хегай, В.К. Определение продольных резонансных частот дерева [Текст] /В.К. Хегай, В.Л. Савич, А.Р. Михитаров – Актуальные проблемы развития лесного комплекса: матер.международ. научн.-техн. конференции – Вологда: ВоГТУ, 2013 г. С. 86-90.
16. Хегай, В.К. Исследование динамического процесса взаимодействия дерева с машиной при гравитационном методе пакетирования [Текст]: Дис. канд. техн. наук / В.К. Хегай – Л. – 1975 г.
17. Kondou, T. Free vibration analysis of a tree structure by the transfer influence coefficient method.1st report. Formulation for a two-dimensional tree structure / Т. Kondou, А. Sucoka, Yu. Yasuda, D.H. Moon // Trans. Jap. Soc. Mech. EngC. – 1991. – 57. № 536. – p. 1091-1098.
18. Распопов, А.С. Продольные и крутильные колебания стержневых систем с древовидной или кольцевой структурой [Текст] / А.С. Распопов // Вестник Днепропетр. нац. ун-тажел.-дор. трансп. им. акад. В. Лазаряна. – 2008. – Вып. 23. – Д.: Изд-во ДНЖТ, 2008. -с. 161-166
19. Яблонский, А.А. Курс теории колебаний[Текст]: 5-е изд., стереотипное / А.А. Яблонский, С.С. Норейко. – СПб.: БХВ-Петербург, 2007. – 336 с.
20. Пановко, Я.Г. Введение в теорию механических колебаний[Текст]/Я.Г. Пановко. – М.: Наука, 1980. – 270 с
21. Бабаков, И.М. Теория колебаний[Текст]: учеб.пособие / И.М. Бабаков. – 4-е изд., испр. – М.: Дрофа, 2004. – 591 с.

References

1. Albyakov M.P., Il'in G.P., Klimov G.B. Spravochnik mekhanizatora lesnogo khozyaistva. M.: Lesnaya prom-st'; 1977. 296 s. [Albyakov M.P., Il'in G.P., Klimov G.B. Handbook of the forestry mechaniser. M.: Lesnaya prom-st'; 1977. 296 p. (in Russ.)]
2. Shegel'man I.R. Issledovanie protsessa mekhanizirovannoi zagotovki pnevoi drevesiny. Dis. ... kand. tekhn. nauk. Petrozavodsk; 1978. 205 s. [Shegel'man I.R. Investigation of the process of mechanised harvesting of stump wood. PhD in technical scienses thesis. Petrozavodsk; 1978. 205 p. (in Russ.)]
3. Zima I.M., Malyutin T.T. Mekhanizatsiya sel'skokhozyaistvennykh robot. M.: Lesn. promyshlennost'; 1964. 550 s. [Zima I.M., Malyutin T.T. Mechanisation of agricultural works. M.: Lesn. promyshlennost'; 1964. 550 p. (in Russ.)]
4. Egipko S.V. Tekhnologiya korchevaniya odinochnykh pnei kombinirovannym rabochim organom. Dis. ... kand. tekhn. nauk. Novochoerkassk; 2007. 212 s. [Egipko S.V. Technology of ripping single stumps with a combined working organ. PhD in technical scienses thesis. Novochoerkassk; 2007. 212 p. (in Russ.)]
5. Trefan L., Trefan S., Trefan S. Ustroistvo dlya valki derev'ev vmeste s kornyami (varianty). Pat. 2001132729/12 RF, 00/00040 HU. Byul. 2005. № 11. [Trefan L., Trefan S., Trefan S. Device for felling trees with roots (variants). Pat. 2001132729/12 RF, 00/00040 HU. Bull. 2005. № 11. (in Russ.)]
6. Bartenev I.M., Drapalyuk M.V., Posmet'ev V.I., Chmelev V.V. Ustroistvo dlya korchevaniya pnei. Pat. 2005110586/12 RF. Byul. 2006. № 36 [Bartenev I.M., Drapalyuk M.V., Posmet'ev V.I., Chmelev V.V. Device for stubbing stumps. Pat. 2005110586/12 RF. Bull. 2006. № 36 (in Russ.)]
7. Egipko S.V. Sposob kombinirovannogo korchevaniya pnei. Pat. 2007142842/12 RF. Byul. 2009. № 24. [Egipko S.V. Method of combined stubbing of stumps. Pat. 2007142842/12 RF. Bull. 2009. № 24. (in Russ.)]
8. Shegel'man I.R. Mashinadlyazagotoviderev'evskornyami. A.s. 406513 MПК 23/08 SSSR. Byul. 1973. № 46. [Shegel'man I.R. A machine for cutting trees with roots. A.s. 406513 MПК 23/08 SSSR. Bull. 1973. № 46. (in Russ.)]
9. Savich V.L. Obosnovanie parametrov oborudovaniya dlya vibrokorchevki pnei i tselykh derev'ev.

Dis. ... kand. tekhn. nauk. Ukhta; 2012. 188 s. [Savich V.L. Substantiation of the parameters of equipment for vibro uprooting of stumps and whole trees. PhD in technical sciences thesis. Ukhta; 2012. 188 p. (in Russ.)]

10. Aleksandrov V.A., Shol' N.R. Konstruirovaniye i raschet mashin i oborudovaniya dlya lesosechnykh rabot i nizhnikh skladov: uchebnyk. Ukhta: UGTU; 2002. 244 s. [Aleksandrov V.A., Shol' N.R. Design and calculation of machines and equipment for logging operations and lower warehouses: a tutorial. Ukhta: UGTU; 2002. 244 p. (in Russ.)]

11. Sur'yaninov, N.G., Dashchenko A.F., Belous P.A. Teoreticheskie osnovy dinamiki mashin: uchebnoye posobie. Odessa: OGPU; 2000. 302 s. [Sur'yaninov, N.G., Dashchenko A.F., Belous P.A. Theoretical foundations of the dynamics of machines: a tutorial. Odessa: OGPU; 2000. 302 p. (in Russ.)]

12. Magnus K. Kolebaniya: Vvedenie v issledovanie kolebatel'nykh sistem. M.: Mir; 1982. 304 s. [Magnus K. Kolebaniya: Oscillations: Introduction to the Study of Oscillatory Systems. M.: Mir; 1982. 304 p. (in Russ.)]

13. Pain H. J. The physics of vibration and waves. London, New York, Sydney, Toronto: John Willey and sons; 1976.

14. Khagai V.K., Savich V.L., Mikhitarov A.R. O vybore optimal'nykh parametrov vibrokorcheval'noi mashiny. Izvestiya Sankt-Peterburgskoi lesotekhnicheskoi akademii. 2015;213:173-183 [Khagai V.K., Savich V.L., Mikhitarov A.R. On the choice of optimum parameters of vibrational tree uprooting machine. News of the Saint Petersburg State Forest Technical Academy. 2015;213:173-183 (in Russ.)]

15. Khagai V.K., Savich V.L., Mikhitarov A.R. Opredeleniye prodol'nykh rezonansnykh chastot dereva. Mater.mezhdunar. nauchn.-tekhn. konferentsii "Aktual'nye problemy razvitiya lesnogo kompleksa". Vologda: VoGTU; 2013. S. 86-90. [Khagai V.K., Savich V.L., Mikhitarov A.R. Determination of the longitudinal resonance frequencies of a tree. Materials of international scientific-technical conference "Relevant problems of forestry complex development". Vologda: VoGTU; 2013. P. 86-90. (in Russ.)]

16. Khagai V.K. Issledovanie dinamicheskogo protsessa vzaimodeistviya dereva s mashinoi pri gravitatsionnom metode paketirovaniya. Dis. ... kand. tekhn. Nauk. L.; 1975. [Khagai V.K. Investigation of the dynamic process of interaction between a tree and a machine using the gravitational packing method. PhD in technical sciences thesis. L.; 1975. (in Russ.)]

17. Kondou T., Sucoka A., Yasuda Yu., Moon D.H. Free vibration analysis of a tree structure by the transfer influence coefficient method. 1st report. Formulation for a two-dimensional tree structure. Trans. Jap. Soc. Mech. Eng C. 1991;57(536):1091-1098.

18. Raspopov A.S. Prodol'nye i krutil'nye kolebaniya sterzhnevnykh sistem s drevovidnoi ili kol'tsevoi strukturoi. Vestnik Dnepropetr. nats. un-tazhel.-dor. transp. im. akad. V. Lazaryana. 2008;23:161-166 [Raspopov A.S. Longitudinal and torsional vibrations of rod systems with tree or ring structure. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport. named after Academician V. Lazaryan. 2008;23:161-166 (in Russ.)]

19. Yablonskii A.A., Noreiko S.S. Kurs teorii kolebanii. SPb.: BKhV-Peterburg; 2007. 336 s. [Yablonskii A.A., Noreiko S.S. The course of the oscillation theory. SPb.: BKhV-Peterburg; 2007. 336 p. (in Russ.)]

20. Panovko Ya.G. Vvedenie v teoriyu mekhanicheskikh kolebanii. M.: Nauka; 1980. 270 s. [Panovko Ya.G. Introduction to the theory of mechanical oscillations. M.: Nauka; 1980. 270 p. (in Russ.)]

21. Babakov I.M. Teoriya kolebanii: ucheb. posobie. M.: Drofa; 2004. 591 s. [Babakov I.M. Theory of oscillations. M.: Drofa; 2004. 591 p. (in Russ.)]

Сведения об авторах:

Хегай Валерий Константинович – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры механики.

Савич Василий Леонидович – кандидат технических наук, доцент кафедры механики.

Михитаров Александр Рафаилович – старший преподаватель кафедры механики.

Information about the authors:

Valery K. Khagai - Dr.Sci. (Technical), Assoc. Prof., Prof., Department of Mechanics.

Vasiliy L. Savich – Cand. Sci. (Technical), Assoc. Prof., Department of Mechanics.

Alexander R. Mikhitarov - Senior lecturer of the Department of Mechanics.

Конфликт интересов

Conflict of interest.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию 15.03.2018.

Received 15.03.2018.

Принята в печать 29.04.2018.

Accepted for publication 29.04.2018.- Prof.,

Для цитирования: Моисеева Т.В., Поляева Н.Ю. Инфокоммуникационная поддержка взаимодействия акторов в теории интересубъективного управления. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2018; 45 (2): 158-170. DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-2-158-170

For citation: Moiseeva T.V., Polyayeva N.Yu. Infocommunication support of the actors' collaboration in the intersubjective management theory. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2018; 45 (2): 158-170. (in Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-2-158-170

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 004

DOI: 10.21822/2073-6185-2018-45-2-158-170

ИНФОКОММУНИКАЦИОННАЯ ПОДДЕРЖКА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ АКТОРОВ В ТЕОРИИ ИНТЕРСУБЪЕКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Моисеева Т.В.¹, Поляева Н.Ю.²

¹Институт проблем управления сложными системами Российской академии наук, 443020, г. Самара, ул. Садовая, 61, Россия,

²Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 443010, г. Самара, ул. Л.Толстого, д. 23, Россия,
e-mail: ¹mtv-2002@yandex.ru, ²nat.polyayeva@yandex.ru

Резюме. Цель. Теория интересубъективного управления, разработанная для управления социальными процессами в обществе, ориентирована на достижение взаимопонимания и консенсуса неоднородных акторов, объединенных в самоорганизующиеся сообщества. Акторы, осознающие себя в проблемной ситуации (а не просто познающие ее со стороны), мотивированы на ее разрешение, а совместные решения принимаются всем сообществом акторов, которые вынуждены договариваться друг с другом, понимая, что их собственных ресурсов не хватает для разрешения проблемы. Повысить эффективность процесса принятия решения и сократить его время, обеспечив акторов средствами взаимодействия друг с другом для поиска единомышленников, ведения переговоров и достижения консенсуса позволит применение современных информационных и коммуникационных технологий. Поэтому целью исследования является поиск средств инфокоммуникационной поддержки теории интересубъективного управления, помогающих организовать взаимодействие акторов, оказавшихся в затруднительных проблемных ситуациях в повседневности. **Метод.** Применен системный подход, метод сравнительного анализа. В целях наглядного представления используется семантическое средство графической визуализации FreeMind. **Результат.** Проведен анализ современных инфокоммуникационных средств, наиболее популярных в среде потенциальных акторов, и произведено их сравнение. Дана оценка возможностей всех анализируемых средств с позиции соответствия их возможностей потребностям интересубъективного управления. Произведен выбор наиболее подходящих инфокоммуникационных средств для применения в компании «ТБМ-Поволжье». **Вывод.** Проведенный анализ инфокоммуникационных средств позволил представить их широкий спектр для применения при практическом приложении теории интересубъективного управления. Исследование выполнено в рамках работ по госбюджетной теме «Интерсубъективное управление инновационным развитием социотехнических объектов с применением онтологических моделей ситуаций» (№ АААА-А16-116040410061-0) института ИПУСС РАН.

Ключевые слова: интересубъективное управление, инфокоммуникационные технологии, гетерогенные акторы, проблемная ситуация

TECHNICAL SCIENCE
COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT

**INFOCOMMUNICATION SUPPORT OF THE ACTORS' COLLABORATION IN THE
INTERSUBJECTIVE MANAGEMENT THEORY**

Tatyana V. Moiseeva¹, Natalya Yu. Polyeva²

¹*Institute for the Control of Complex Systems of Russian Academy of Sciences,*

¹*61 Sadovaya Str., Samara 443020, Russia,*

²*Volga State University of Telecommunications and Informatics,*

²*23 L. Tolstogo Str., Samara 443010, Russia,*

¹*e-mail:mtv-2002@yandex.ru, ² e-mail:nat.polyeva@yandex.ru*

Abstract. Objectives. *The theory of intersubjective management, designed to manage social processes in society, is aimed at achieving mutual understanding and consensus among heterogeneous actors united in self-organized communities. Actors who are aware of themselves in a problem situation (rather than just viewing it from the outside) are motivated to solve it, and joint decisions are made by the entire community of actors who are forced to negotiate with each other, realizing that their own resources are not enough to solve the problem. The use of modern information and communication technologies could allow to increase the effectiveness of the decision-making process and reduce its time, providing actors with the means of interacting each other in the process of seeking like-minded people, negotiating and reaching consensus. Therefore, the aim of the research is to find means of infocommunication support for the theory of intersubjective management which help to organize the interaction of actors who found themselves in difficult problem situations in everyday life.*

Method. *The system approach, method of the comparative analysis are applied. For the purpose of better presentation the semantic mean of graphical visualization Free Mind is used. Result.* *The analysis of modern infocommunication facilities, the most popular among potential actors, is carried out and their comparison is made. The evaluation of the capabilities of all the analyzed means from the point of view of their suitability to the needs of intersubjective management is given. The choice of the most suitable infocommunication facility for use in the company "TBM-Povolzhje" is made. Conclusion.* *The analysis of infocommunication means allowed to present their wide spectrum for application in practice while using the theory of intersubjective management. The research was performed as part of the state budget theme "Intersubjective Management of Socio-technical Objects Innovative Development with the Use of Situations Ontological Models" (No. AAAA-A16-116040410061-0) of ICCS RAS.*

Keywords: *intersubjective management, infocommunication technologies, heterogeneous actors, problem situation*

Введение. Субъектно-ориентированное интерсубъективное управление социальными процессами, базирующееся на постнеклассической научной рациональности и концепции свободного общества, было предложено в [1]. Такое управление делает ставку на ненасильственные способы принятия решений, без применения инструментов, принятых в традиционном менеджменте, и связано с разрешением проблемных ситуаций, в которых оказываются акторы (люди, которые не просто наблюдают, что происходит в окружающем их мире, но и стараются стать его активными творцами), осознающие себя в проблемной ситуации, а не просто познающие ее со стороны [2].

В основе нового подхода к управлению лежит достижение взаимопонимания и консенсуса неоднородных акторов, мотивированных на разрешение проблемной ситуации. Совместные решения принимаются всем сообществом акторов, которые, в силу ограниченности собственных ресурсов (интеллектуальных, материальных, временных и др.), начинают вести переговоры и договариваться друг с другом [3], создавая коммуникативную смысловую модель, интегрирующую взгляды всех акторов на проблемную ситуацию. Весь процесс – от момента осо-

знания отдельными акторами проблемной ситуации до принятия интерсубъективного решения – занимает достаточно много времени, сократить которое было бы возможно с помощью современных инфокоммуникационных технологий, повысив эффективность принятия решения в группе.

Постановка задачи. Процесс принятия решения в интерсубъективном сообществе состоит из следующих этапов [4]. Погруженный в проблемную ситуацию актер осознает ее, воспринимая и представляя по-своему, выстраивая в своем сознании субъективную модель ситуации. При этом другие акторы, оказавшиеся в подобной проблемной ситуации, имеют свое видение ее смысла и выстраивают свои модели той же ситуации.

Рациональные акторы, понимая ограниченность собственного видения, готовы объединиться с другими субъектами, отказываясь от принятия индивидуального решения из-за дефицита личных ресурсов. Таким образом, акторы $A_1 \dots A_n$, $n = \{1, \dots, N\}$, оказавшись в проблемной ситуации PS_j , где $j = \{0, \dots, J\}$, осознав проблему P_i , где $i = \{1, \dots, I\}$, объединяются в сообщество $G_i = \{A_1, \dots, A_n\}$, где $i = \{1, \dots, I\}$ для разрешения ситуации.

Формулируя смысл ситуации, актер использует те знания, которые помогут ему осознать проблемную ситуацию, обосновать свое видение смысла, а затем принять решение в группе, которая образовывается не по команде извне, а по желанию активных участников проблемной ситуации.

Пытаясь организовать сходимость смыслов и прийти к консенсусу, акторы представляют свое видение ситуации в соответствии с ее характером, ценностными установками, культурой и образованием акторов, временем, отведенным на решения проблемы, доступных инфокоммуникационных средств, и предлагают решения $D_i = \{d_1, \dots, d_n\}$, где $i = \{1, \dots, I\}$, а d_n – решение, предлагаемое актором A_n . В начале процесса обсуждения каждый актер A_k может одобрять множество решений $D_k = \{d_1, \dots, d_j\}$.

Процесс принятия решения в самоорганизованной ситуативной ассоциации [5] начинается с того, что акторы договариваются о правилах ведения обсуждения, регламентирующих формат обсуждения, технологии коммуницирования, форму общения, время, которое можно отвести на принятие решения, и пр. в соответствии с нормативной интерсубъективностью. Обычно в такой группе акторов появляется лидер, который сначала руководит процессом образования ситуативной ассоциации, а затем контролирует исполнение правил нормативной интерсубъективности и готов взять на себя функции по управлению процессом ведения переговоров, по сути, являясь модератором переговорного процесса. Обсуждение проблемной ситуации, выдвижение гипотез и вариантов решения проблемы опираются на технологии ведения аргументированного дискурса [6, 7] и инфокоммуникационные технологии [8]. Обсуждение продолжается до тех пор, пока $D_1 \cap D_2 \cap \dots \cap D_k = \emptyset$. Как только акторы придут к консенсусу, пересечение D_i станет не равно нулю: $D_1 \cap D_2 \cap \dots \cap D_k \neq \emptyset$, и им удастся принять общее решение итог: $D_1 \cap D_2 \cap \dots \cap D_k = d$ итог.

Потребность в применении современных инфокоммуникационных средств, способствующих упрощению выстраивания связей и повышению эффективности взаимодействия субъектов, прослеживается на всех этапах интерсубъективного управления.

Методы исследования. Основной задачей информационной системы поддержки теории интерсубъективного управления является удовлетворение информационных потребностей взаимодействия акторов, осознавших себя в проблемной ситуации и принимающих решение относительно ее разрешения. Наиболее популярные современные электронные средства коммуникаций, которые следует проанализировать с позиции возможности их применения для организации коммуникаций акторов, представлены на рис. 1. Существуют разные способы организации общения между людьми. Наиболее распространено использование **ИМ-клиентов** (от английского Instant messaging), которые следует рассматривать в первую очередь среди средств организации коммуникаций акторов.



Рис.1. Современные электронные средства коммуникаций
Fig.1. Modern electronic communication technologies

Это одна из разновидностей технологий коммуникации в Интернете, связанная с мгновенным обменом сообщениями и другим контентом, в основном, между двумя участниками, но большинство таких программ-клиентов может применяться для организации текстовых чатов в группах или видеоконференций между акторами. При помощи IM-приложений могут передаваться сообщения, звуковые сигналы, изображения, видео и прочая информация, необходимая акторам для анализа проблемных ситуаций. Подобные коммуникации осуществляются с помощью клиентской программы, так называемого мессенджера. Большинство IM-клиентов дает возможность определить, подключены ли в данный момент абоненты из списка контактов, т. е. с какими акторами возможно в данный момент организовать коммуникационную сессию. Главным достоинством данных приложений является легкость внедрения и дешевизна, причем некоторые системы можно устанавливать и использовать бесплатно.

Наиболее популярны сегодня приложения Viber, What's App и Telegram, которыми пользуется подавляющее большинство людей, имеющих устройства (смартфон, планшет или компьютер с выходом в Интернет), на которые их можно установить.

Приложение **Viber** позволяет, используя сеть Wi-Fi или мобильные сети, совершать бесплатные звонки, а также передавать текстовые сообщения, изображения, аудио- и видео-сообщения, файлы и документы, обеспечивая коммуникации акторов, объединившихся в самоорганизованное сообщество (ситуативную ассоциацию). В Viber предусмотрена функция создания многопользовательской беседы (комнаты), с помощью которой акторы могут обмениваться текстовыми, звуковыми и медиа-файлами для обсуждения проблемных ситуаций. Платная опция Viberout позволяет звонить на мобильные и стационарные телефоны, на которых не установлен Viber, для того чтобы при необходимости дозвониться людям, участвующим в разрешении проблемной ситуации и не имеющим смартфоны. К дополнительными достоинствами приложения, позволяющими рассматривать его в контексте решаемых задач, отнесем следующее: программа обладает быстрым стартом, а после установки располагает списком контактов пользователей, у которых уже установлен Viber; приложение практически не тратит ресурсы, а значит, и батарею устройства.

К недостаткам приложения, лимитирующим его применение для решения коммуникационных задач интересубъективного управления, можно отнести отсутствие средств создания групповых видеоконференций. Поиск акторов также ограничен, поскольку с помощью Viber невозможно создавать группы по интересам и организовывать в них общение всех акторов, попавших в данную проблемную ситуацию.

What's App – не менее популярная бесплатная система мгновенного обмена текстовыми сообщениями, поиск акторов в которой реализуется путем анализа номеров в телефонной книжке абонента или в базе контактов программы. В What'sapp есть функция создания много-

пользовательских чатов, в которых акторы могут обмениваться текстовыми сообщениями и отправлять медиафайлы (коммуницировать) после того как они нашли друг друга.

Дополнительных функций, поддерживающих теорию интерсубъективного управления, программа не имеет. Функционал схож с программой Viber. Но, к сожалению, многопользовательских чатов оказывается недостаточно для полноценной инфокоммуникационной поддержки переговоров акторов.

Telegram - кроссплатформенный мессенджер, позволяющий обмениваться сообщениями и медиа-файлами многих форматов, не менее популярный в России, чем Viber и What`s App, в котором можно организовать общение с целью разрешения проблемных ситуаций. Поиск акторов возможен по номеру телефона или предполагаемому имени пользователя. Общение акторов возможно организовать с помощью групп, супергрупп и каналов. Группа в Telegram ограничивает число участников до 200 человек, каждый пользователь может добавлять новых участников по приглашению или ссылке. Переписка, которая ведется внутри группы акторов, недоступна пользователям извне. Участники группы могут обмениваться текстовыми сообщениями и медиа-файлами. Супергруппа отличается от обычной группы только числом участников - до 5000 человек. Также в Telegram можно создавать каналы с неограниченным числом пользователей, однако существенным недостатком, с точки зрения акторов, является невозможность комментировать и обсуждать записи, а в больших размерах группы нет необходимости, поскольку время обсуждения в них может существенно увеличиваться, и в большинстве случаев сходимость решений не достигается. Наличие администратора позволяет актору – модератору управлять каналом, но реализовать многосторонний дискурс в нем невозможно.

По сравнению с предыдущими мессенджерами возможности Telegram более соответствуют удовлетворению потребностей интерсубъективного управления, но после того, как данное средство заблокировалось, и огромное количество пользователей не могли воспользоваться приложением и его функциями, при условии рецидивов блокирования акторы могут остаться без средства коммуникаций. Поэтому перебои в работе данного продукта являются колоссальным недостатком, поскольку порой решение проблемных ситуаций требует моментального взаимодействия между акторами. Таким образом, несмотря на большой перечень полезных функций, их оказывается недостаточно для обеспечения инфокоммуникационной поддержки поиска выхода из проблемной ситуации.

Еще одно инфокоммуникационное средство, теряющее сегодня свою популярность, но все еще широко используемое – это **Skype**. Skype - это многофункциональный Интернет-мессенджер, предоставляющий акторам множество альтернативных способов коммуникации. К главным достоинствам Skype в контексте применения для решения задач теории интерсубъективного управления следует отнести возможность создания групповых видео-чатов и передачи файлов любых форматов. Данные функции важны при разрешении проблемных ситуаций, но зачастую их оказывается недостаточно для урегулирования проблемы. Акторы не могут, например, создавать группы по интересам, проводить опросы. Ограничен и поиск новых акторов, ведь необходимо знать его логин, то есть большая часть акторов, оказавшихся в подобной проблемной ситуации может быть упущена. Также к недостаткам программы с точки зрения урегулирования проблемной ситуации можно отнести низкую скорость ее работы, и при низкой скорости Интернет-соединения ситуацию не удастся оперативно разрешить.

Электронная почта — это практически аналог обычной почты, позволяющий пересылать и получать электронные сообщения, которые доставляются и отправляются при помощи устройств, подключенных к веб-сетям, пользователям компьютерной сети. Наличие у актора элементарной компьютерной грамотности позволило бы ему включиться в сообщество людей, оказавшихся в подобной ситуации, воспользовавшись данным средством, имеющим удобный сервис, с помощью которого акторы могут организовывать письма по теме или по другим критериям (Дата, Отправитель и т. д.), сортировать их, организовывая папки, привязанные к разным проблемным ситуациям. Применение цитирования позволяет выстроить цепочку отправленных/полученных писем, т.е. вести диалог между акторами и сохранять его результаты. Однако данное средство коммуникаций позволяет конституировать связи только между акторами,

которые уже ранее определили свою принадлежность к одной проблемной ситуации и знают адреса электронной почты друг друга. Такое общение практически невозможно в интерактивном режиме и происходит с задержкой по времени. Для того чтобы оставаться в курсе событий, актору нужно регулярно проверять учетную запись e-mail, иначе он может пропустить важные и срочные сообщения. Средствами электронной почты также невозможно создавать многопользовательские чаты, видеоконференции, группы по интересам и опросы. В целом, следует отметить, что функциональные возможности поддержки интересубъективного управления у электронной почты сильно ограничены.

Специализированное программное обеспечение – это совокупность программ для решения узкоспециальных задач. В отличие от универсальных продуктов, данный тип ПО направлен на выполнение конкретных действий. Зачастую в специализированных программах не учитываются роль и потребности человека, и некоторые функции могут быть не удобны для пользователя или вовсе отсутствовать.

Важно иметь в виду, что предпочтения акторов зависят от контекста и характера кооперации и взаимодействия между ними, а шкалы предпочтений не являются жёстко заданными априори и строятся в процессе проведения переговоров [9]. Это обстоятельство ограничивает применение классических математических методов при построении онтологической модели ситуации и приводит к необходимости использования других методов и инструментальных средств, к числу которых относятся **мультиагентные модели и технологии** [10-11], использующие понятие мобильного программного агента, реализованного как самостоятельная специализированная компьютерная программа или элемент искусственного интеллекта [12]. Традиционные методы поиска решений не всегда могут быть адаптированы к миру повседневности, а мультиагентные технологии ориентированы на принципиально новый метод решения задач, и используют взаимодействие множества программных модулей (агентов). Современное мультиагентное ПО разрабатывалось для решения конкретных задач, поэтому для использования их в качестве поддержки теории интересубъективного управления необходима адаптация продуктов или создание новых. Также недостатком можно назвать сложность формулирования акторами своих собственных целей, задач и способов решений для агента.

Важный способ коммуникации акторов - это общение в широко распространенных сегодня **социальных сетях** (Facebook, ВКонтакте, Одноклассники и др.). Социальные сети являются не только средством для поиска людей и общения с ними, но еще и информационной средой, необходимой акторам. Пользователь (актор – модератор проблемной ситуации) может создавать группы (ситуативные ассоциации) по интересам (проблемным ситуациям), объединять разных акторов в общую беседу, искать и добавлять новых участников проблемной ситуации. В группах можно обмениваться различными материалами, что позволило бы акторам приводить аргументы в защиту собственных взглядов, организовывать обсуждения и опросы, т. е. вести диалог, в котором все акторы смогут сначала представить свои точки зрения, затем обсудить возможности выхода из проблемной ситуации, изменить свое мнение, понимая, что иначе единое решение не будет принято, и, в конце концов, прийти к консенсусу.

К минусам социальных сетей относится то, что помимо урегулирования ряда вопросов в социальных сетях, связанных с проблемными ситуациями, пользователи могут пролистывать «Ленту», общаться с друзьями и пр., т. е. отвлекаться от решения задачи, затягивая время обсуждения, однако в целом возможности социальных сетей соответствуют потребностям интересубъективного управления. Проведенный анализ различных инфокоммуникационных средств показал, что наиболее подходящими средствами, поддерживающими теорию интересубъективного управления, являются средства на базе мультиагентных технологий и социальные сети (рис. 2).

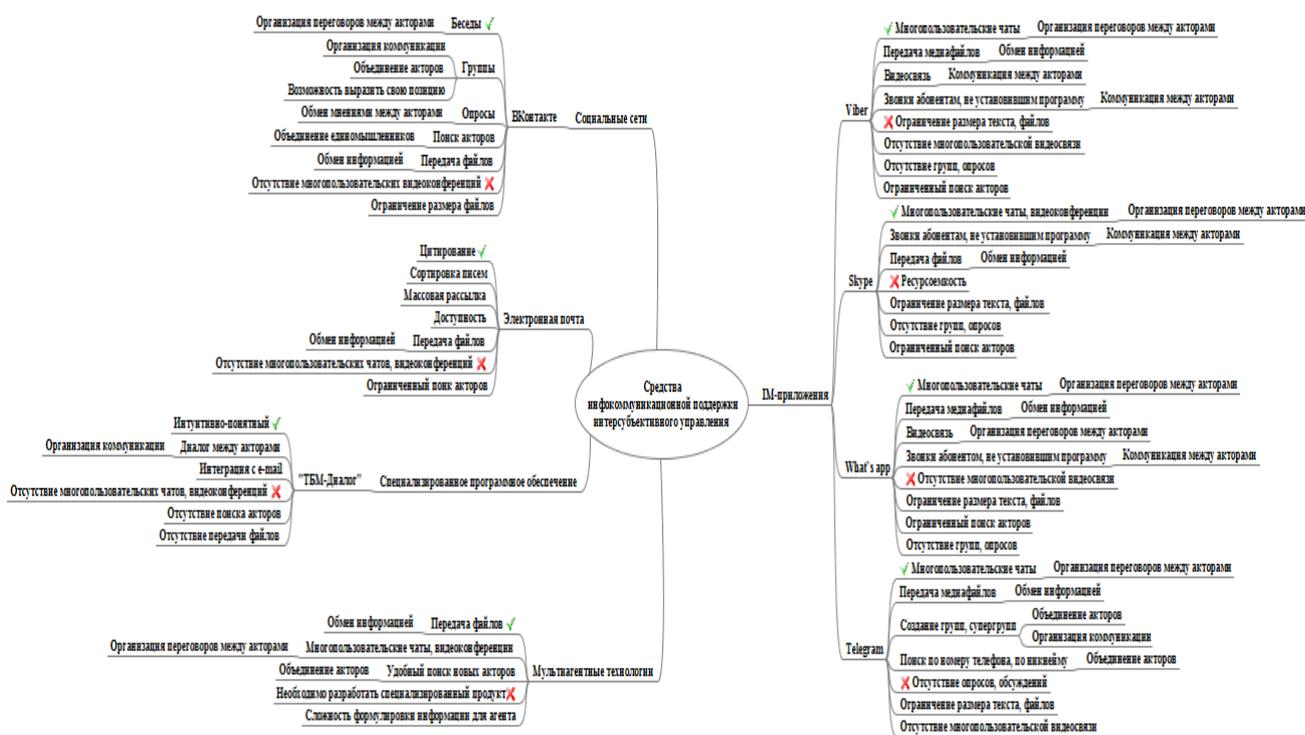


Рис.2. Достоинства и недостатки современных инфокоммуникационных средств
Fig.2. Strengths and weaknesses of modern infocommunication means

Обсуждение результатов. Апробация результатов исследования проводилась в компании «ТБМ-Поволжье», в которой для разрешения выявленных проблемных ситуаций было выбрано и применено электронное средство коммуникационной поддержки.

Компания занимается производством комплектующих для производства оконных конструкций, дверей, фасадов и мебели. Проведенный опрос сотрудников показал, какие инфокоммуникационные средства наиболее популярны в компании «ТБМ-Поволжье». Оказалось, что работники компании активно используют М - приложения (Viber и Telegram) и электронную почту для общения друг с другом в ходе разрешения производственных проблемных ситуаций и в повседневности, а также специализированный программный продукт «ТБМ-Dialogue», установленный на всех компьютерах компании (рис. 3). Все перечисленные средства могут оказаться хорошей поддержкой интерсубъективного управления разрешением проблемных ситуаций, возникающих у сотрудников компании «ТБМ-Поволжье» на производстве и в быту.

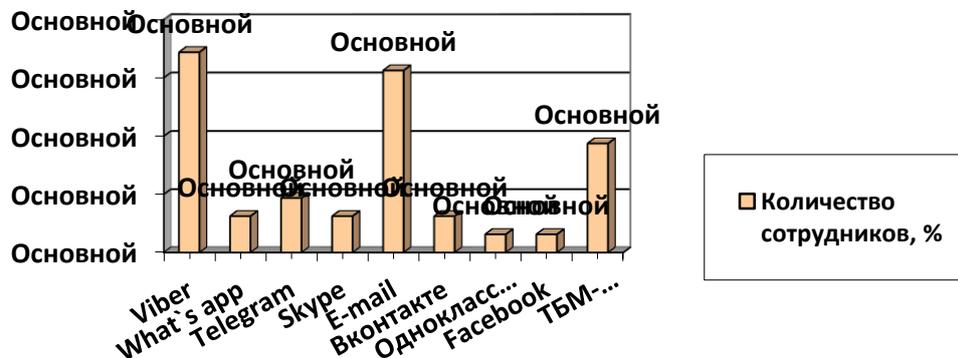


Рис 3. Инфокоммуникационные средства, применяемые сотрудниками компании «ТБМ-Поволжье»

Fig 3. Infocommunication means used by staff members of “ТБМ-Povolzhje” company

Как видно из рис. 3, большая часть сотрудников компании «ТБМ-Поволжье» активно используют Viber, поскольку функционал приложения удобен, прост для освоения и применения, позволяет вести не только диалог, но и полилог при использовании так называемых «об-

щих комнат». Обычно обращение к средствам Viber происходит в тех случаях, когда сотрудникам нужно обменяться короткими сообщениями в режиме реального времени. Из-за отсутствия возможности создания групп по интересам и групповых видеоконференций Viber имеет ограничения по применению для разрешения проблемных ситуаций, складывающихся в коллективе «ТБМ-Поволжье», т. к. его функционал имеет ряд необходимых, но недостаточных функций для организации обсуждения между участниками проблемной ситуации.

Активное использование программы Skype сотрудниками компании обусловлено тем, что главными достоинствами приложения они считают возможность создания групповых видео-чатов и передачи файлов любых форматов. Однако акторы-сотрудники не могут создавать группы по интересам и вести опросы в Skype, т.е. коммуницировать в группах, высказывая свое мнение, слушая чужое, изменяя свое решение, принимая аргументы других участников группы с тем, чтобы прийти к консенсусу и принять единое решение. Поиск новых акторов также ограничен, поскольку их логины заранее могут быть неизвестны, поэтому большая часть акторов, оказавшихся в подобной проблемной ситуации, может быть упущена.

Электронная почта необходима большинству сотрудников «ТБМ-Поволжье» для ведения производственных процессов. Это инфокоммуникационное средство используется, в основном, для ведения рабочей переписки. Для организации коммуникаций в рамках обсуждения проблемной ситуации, сложившейся в «ТБМ-Поволжье», применение электронной почты оказалось не очень удобным из-за запаздывания информации и невозможности ведения диалога, что резко снизило ее медиационные функции.

Средством организации общения между сотрудниками компании, которое использовалось еще до внедрения принципов субъектно-ориентированного интерсубъективного управления, являлось специальное программное обеспечение, разработанное в «ТБМ-Поволжье». Это программный продукт «ТБМ-Dialogue», написанный на базе программы PSI - приложения для обмена мгновенными сообщениями пользователей. Программа позволяет легко общаться с любым сотрудником, подключенным к этой глобальной сети обмена, мгновенными сообщениями с помощью таких сервисов и имеет корпоративную электронную почту. Все e-mail адреса интегрированы с программой.

«ТБМ-Dialogue» работает достаточно быстро, имеет интуитивный, дружелюбный интерфейс (рис.4), понятный новому пользователю, а сотрудники могут пользоваться всеми ее функциями, не замедляя работу всей системы.

Среди возможностей программы «ТБМ-Dialogue» отсутствует функция поддержки многопользовательского чата, ведения видеоконференций, создания групп и опросов. «ТБМ-Dialogue» устанавливается только на персональные компьютеры компании, и ее сотрудники не могут установить программу на свой личный смартфон, чтобы иметь доступ к сервисам и в нерабочее время. С позиции интерсубъективного управления это колоссальный недостаток программного продукта.

Социальная сеть ВКонтакте оказалась единственным средством, используемым в компании «ТБМ-Поволжье», которое помогает акторам находить единомышленников, оказавшихся в подобной проблемной ситуации. Препятствием для применения социальной сети ВКонтакте в «ТБМ-Поволжье» стало то, что часть сотрудников компании не зарегистрирована в социальной сети. Для того чтобы дать возможность всем членам коллектива участвовать в решении проблем, всем желающим было предложено оказать помощь в регистрации в социальной сети и обучении азам ее применения.

Выбранное инфокоммуникационное средство (социальная сеть ВКонтакте) было использовано для разрешения проблемной ситуации, связанной с тем, что в компании ухудшилась комплектация товара, отгрузки стали нерегулярными, что вызвало перебои с доставкой продукции к клиентам. Проведенное исследование позволило выявить узкое место. Оказалось, что регулярная отгрузка продукции страдает из-за снижения уровня комплектации товара. Среди рабочих складского отдела были выявлены три человека, которые регулярно опаздывали на работу. Начав работу с опозданием, колеровщик не успевал подготовить нужный объем продук-

ции по своему сектору, комплектовщик отдела распила ошибался в размерах подоконников и оконный профилюй, а комплектовщик отдела сбора заказов сформировывал заявки только из того товара, который был подготовлен, вследствие чего часть продукции клиент не получал в согласованный срок.

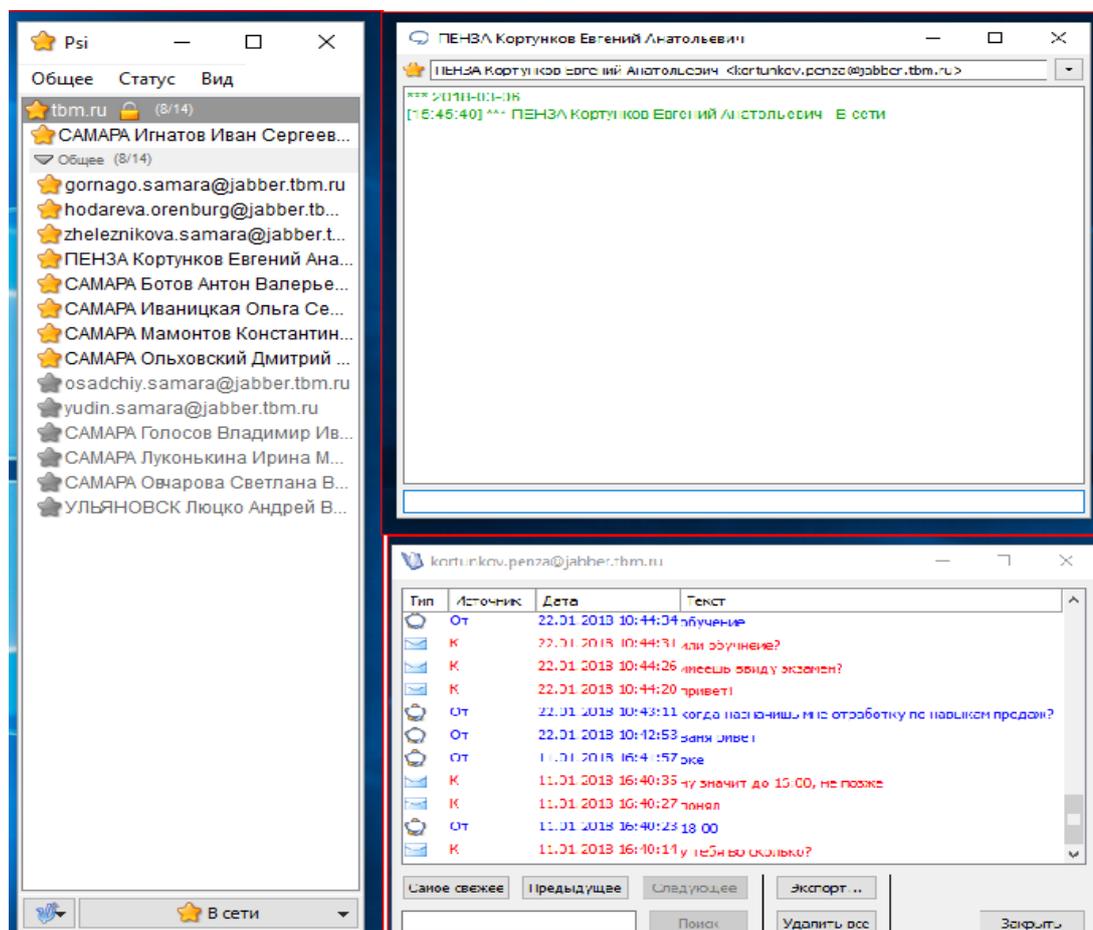


Рис.4. Интерфейс программы «ТБМ-Dialogue»

Fig.4. «TBM-Dialogue» programme interface

В данную проблемную ситуацию оказались вовлечены сотрудники цеха подготовки заготовок, руководство цеха, руководство компании. Первоначально ситуация была обсуждена в рамках цеха, часть сотрудников которого опаздывала. В результате оказалось, что все рабочие цеха (девять человек) осознают себя в данной проблемной ситуации, поскольку премию они получают по результатам коллективной работы. Все они выступили как акторы, неравнодушные к выявленной проблеме.

Среди них сразу выделился лидер (начальник цеха, который также попадал утром в пробку), сыгравший роль модератора, под руководством которого акторы начали действовать. Практически сразу они пришли к выводу, что искать решение, не привлекая других сотрудников, было бы неправильно, поскольку, возможно, у них есть свое видение проблемы и варианты решения. Обращение к коллегам было размещено в социальной сети ВКонтакте в группе и в беседе коллег. Было создано сообщество и беседа для сотрудников компании с целью урегулирования проблемы.

Как отмечалось в [1], акторы, стремясь уловить смысл проблемной ситуации, т. е. понять ее, формируют, с одной стороны, собственное предпонимание ситуации на основе совокупности априорных персональных знаний каждого участника, что субъективно окрашивает дальнейшее понимание, а с другой стороны, в результате соглашений акторов в рамках семантической, эмпирической, логической, операциональной и нормативной интерсубъективностей [13] формируются интерсубъективные знания, общие для всех участников проблемной ситуации

«ТБМ-Поволжье». Поэтому после того, как акторы нашли друг друга и объединились в сообщество, им необходимо средство, позволяющее организовать коммуникационный процесс с целью формирования интересубъективных знаний для дальнейшего урегулирования проблемной ситуации. Выстраивалось такое общение средствами ВКонтакте (организация бесед или групп - сообществ по интересам).

При создании сообществ по интересам пользователи «ТБМ-Поволжье» могли придумать название, выбрать тематику и тип группы, а также прикрепить веб-сайт и адрес пользователя.

Учитывая то, что организованные ВКонтакте группы (сообщества) могут быть трех типов («Открытая» - могут вступить все желающие пользователи (акторы); «Закрытая» - можно вступить по приглашению или подав заявку; «Частная» - можно попасть только по приглашению руководителей сообщества (акторов – модераторов)), такая возможность выбора типа группы - удобная функция для ограничения круга лиц, которые могут принимать участие в решении проблемной ситуации, поскольку иногда имеется сформировавшаяся группа акторов, а иногда необходимо осуществить поиск единомышленников, а затем пригласить их в сообщество.

После создания групп или бесед начинается поиск акторов, которые оказались в подобной проблемной ситуации. Реализовать данную функцию в беседах можно путем добавления создателем (модератором) или участником беседы (актором) другого пользователя. Сторонний человек в беседу попасть не сможет. Пользователи, которых добавляют в беседу, должны быть в «друзьях» у добавляющего (модератора или рядового актора). Добавление людей в группы не имеет таких ограничений, как добавление в беседы. В зависимости от типа созданной группы происходит присоединение новых пользователей. В открытую группу может попасть любой пользователь, который в строке поиска вводит название группы или ID-адрес страницы, либо которого пригласил администратор.

Акторы, находящиеся в проблемной ситуации, изначально имели разные представления о ситуации, т. е. отличные точки зрения на возможное решение проблемы. После того, как они оказались в одной группе (беседе), началось обсуждение проблемной ситуации, в ходе которого у акторов сформировалось интересубъективное знание, разделяемое всеми участниками сообщества. Беседы ВКонтакте реализуют такое обсуждение как многопользовательский чат, а группы обладают специальной функцией создания обсуждений (рис. 5).

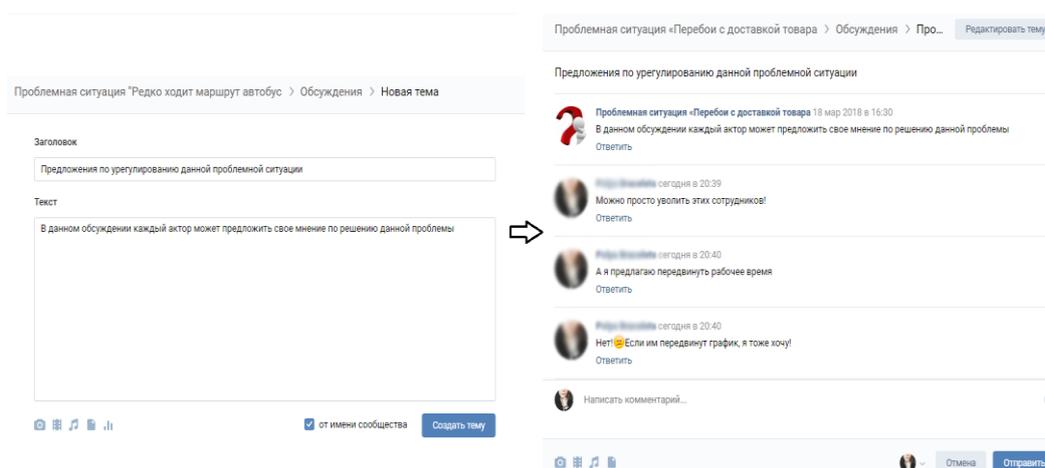
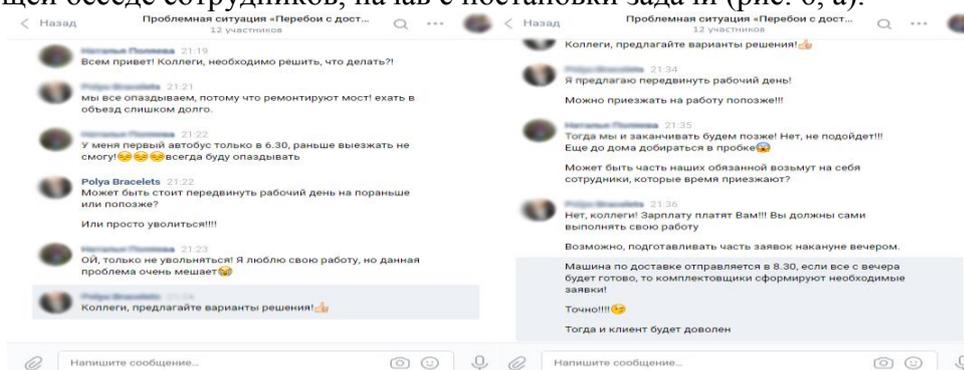


Рис.5. Создание «Обсуждения» и общение в группе ВКонтакте
Fig.5. Creation of «Discussion» and communications in the VKontakte group

В рамках обсуждения акторы обменивались файлами, а также создавали опросы. Для того чтобы оперативно получать новую информацию внутри созданного сообщества, использовалась функция «Уведомление о новых записях», подключив которую акторы могли видеть оповещения о появлении новой информации.

Беседы ВКонтакте реализовали общение акторов в реальном времени. Подключив оповещения, они могли получать уведомления о новых сообщениях беседы и мгновенно на них

отвечать. Для решения проблемной ситуации акторы компании «ГБМ-Поволжье» организовали переписку в общей беседе сотрудников, начав с постановки задачи (рис. 6, а).



а) Постановка задачи в беседе ВКонтакте

a) Setting a task in a VK conversation

б) Многосторонний дискурс акторов

b) Multilateral discourse of actors

Рис.6. Обсуждения проблемной ситуации акторами ВКонтакте

Fig.6. Problem situation discussion by the actors using VKontakte

После постановки задачи и обсуждения акторами - сотрудниками проблемы (когда был выявлен общий для всех смысл ситуации) последовал этап предложения решений. В многостороннем дискурсе участвовали все сотрудники, заинтересованные в урегулировании проблемной ситуации. Каждый актор высказывал свое видение решения проблемы. Обсуждения продолжались до тех пор, пока не было найдено решение проблемной ситуации, удовлетворяющее каждого актора группы (рис. 6, б).

Вывод. Проведенный анализ инфокоммуникационных средств показал, что в рейтинге наиболее подходящих для теории интересубъективного управления средств из числа достаточно распространенных сегодня первое место занимают социальные сети, дающие акторам возможность образовать сообщество участников проблемной ситуации, организовать площадку для ее обсуждения, сформировать единое смысловое пространство и принять решение. Применение некоторого специализированного программного продукта, разработанного специально для удовлетворения потребностей интересубъективного управления, возможно, смогло бы сделать процесс принятия решения более эффективным, однако потребовало бы от пользователей дополнительных трудозатрат, связанных с поиском данного средства, установкой и обучением правилам работы. К тому же большая часть акторов, заинтересованных в разрешении проблемных ситуаций и не имеющих данного программного продукта, оказалась бы лишена возможности принять участие в обсуждении, объединив, таким образом, групповое решение.

Библиографический список:

1. Vittikh V.A. Introduction to the theory of intersubjective management // Group Decision and Negotiation - 2015 - Issue 1 - Vol. 24 - p.67-95.
2. Виттих, В.А. О понятиях «познание» и «осознание» в науке об управлении // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XVIII Междунар. конф. – Самара: Изд-во СамНИЦ РАН, 2015. – С.200-202.
3. Арпентьева, М.Р., Моисеева, Т.В. Переговоры в теории интересубъективного управления // Онтология проектирования. – 2017. - No1(23).– С.102-114.
4. Моисеева Т.В., Поляева Н.Ю. Моделирование проблемной ситуации в теории интересубъективного управления // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2018. - № 45(1). – С. 160-171.
5. Виттих В.А., Моисеева Т.В. Интересубъективное управление: от теории к практике. // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: труды XVIII Междунар. конф. Самара: ООО «Офорт». 2016. С. 53 – 62.
6. Eemeren, Frans H. Grootendorst R. Speech Acts in Argumentative Discussions. Dordrecht, Holland / Cunnaminson, USA, 1984;
7. Mohammed D., Lewinski M. Argumentation and Reasoned Action. // Proceedings of the 1st European Conference on Argumentation. - Lisbon, 2015.
8. Гагарина Л.Г., Баин А.М. и др. Введение в инфокоммуникационные технологии. // Учебное

- пособие. Под ред. д.т.н., проф. Л.Г. Гагариной. - М.: ИД ФОРУМ: НИЦ ИНФРА, 2013. - 336с.
9. Сапир Ж. К экономической теории неоднородных систем (опыт исследования децентрализованной экономики) // М.: Государственный университет – Высшая школа экономики, 2001. – 248 с.
 10. Виттих В.А., Скобелев П.О. Мультиагентные модели взаимодействия для построения сетей потребностей и возможностей в открытых системах // Автоматика и телемеханика, №1, 2003 – 177-185 с.
 11. Скобелев П.О. Мультиагентные технологии в промышленных применениях: к 20-летию основания Самарской научной школы мультиагентных систем // Мехатроника, автоматизация, управление, №12, 2010 – 33-46 с.
 12. Амелин К.С., Амелина Н.О. и др. Мультиагентные технологии, Разработка приложений для мобильных интеллектуальных систем на платформе Intel Atom // Санкт–Петербург, 2012. – 220 с.
 13. Хьюбнер К. Истина мифа. – М.: Республика, 1996.
 14. Виттих В.А. Онтологические модели ситуаций в процессах принятия коллегиальных решений // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XI Международной конференции. – Самара: Самарский научный центр РАН, 2009.

References:

1. Vittikh V.A. Introduction to the Theory of Intersubjective. Group Decision and Negotiation. 2015;24(1):67–95.
2. Vittikh V.A. O ponyatiyakh “poznanie” i “osoznanie” v nauke ob upravlenii. Trudy XVII Mezhdunar. konf. “Problemy upravleniya i modelirovaniya v slozhnykh sistemakh”. Samara: Izd-vo SamNTs RAN; 2015. S.200-202. [Vittikh V.A. On the concepts of “knowledge: and “awareness” in the science of management. Proceedings of the XVII Intern. Conf. “Problems of control and modeling in complex systems”. Samara: Publishing house of SamNT RAN; 2015. P.200-202 (in Russ.)]
3. Arpent'eva M.R., Moiseeva T.V. Peregovory v teorii intersub"ektivnogo upravleniya. Ontologiya proektirovaniya. 2017;1(23):102-114. [Arpent'eva M.R., Moiseeva T.V. Negotiations in the theory of intersubjective management. Ontology of Designing. 2017;1(23):102-114. (in Russ.)]
4. Moiseeva T.V., Polyayeva N.Yu. Modelirovanie problemnoi situatsii v teorii intersub"ektivnogo upravleniya. Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. 2018;45(1):160-171. [Moiseeva T.V., Polyayeva N.Yu. Modeling of problematic situations in intersubjective control theory. Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences. 2018;45(1):160-171. (in Russ.)]
5. Vittikh V.A., Moiseeva T.V. Intersub"ektivnoe upravlenie: ot teorii k praktike. Trudy XVIII Mezhdunar. konf. “Problemy upravleniya i modelirovaniya v slozhnykh sistemakh”. Samara: OOO “Ofort”; 2016. S. 53 – 62. [Vittikh V.A., Moiseeva T.V. Intersubjective control: from theory to practice. Proceedings of the XVIIIth International Conference “Problems of control and modeling in complex systems”. Samara: OOO “Ofort”; 2016. P. 53 – 62. (in Russ.)]
6. Eemeren F.H. Grootendorst R. Speech acts in argumentative discussions. Dordrecht, Holland / Cunnaminson, USA; 1984.
7. Mohammed D., Lewinski M. Argumentation and reasoned action. Proceedings of the 1st European conference on argumentation. Lisbon; 2015.
8. Gagarina L.G., Bain A.M. i dr. Vvedenie v infokommunikatsionne tekhnologii. Uchebnoe posobie. Pod red. L.G. Gagarinoi. M.: ID FORUM: NITs INFRA; 2013. 336 s. [Gagarina L.G., Bain A.M. et al. Introduction in infocommunication technologies. Tutorial. L.G. Gagarina (Ed.). M.: ID FORUM: NITs INFRA; 2013. 336 p. (in Russ.)]
9. Sapir Zh. Kekonomicheskoi teorii ineodnorodnykh sistem (opytissledovaniyadetsentralizovannoeekonomiki). M.: Gosudarstvennyi universitet – Vysshaya shkola ekonomiki; 2001. 248 s. [Sapir Zh. To the economic theory of heterogeneous systems (experience of decentralized economy research). Moscow: State University - Higher School of Economics; 2001. 248 p. (in Russ.)]
10. Vittikh V.A., Skobelev P.O. Mul'tiagentnye modeli vzaimodeistviya dlya postroeniya setei potrebnosti i vozmozhnostei v otkrytykh sistemakh. Avtomatika i telemekhanika. 2003;1:177-185. [Vittikh V.A., Skobelev P.O. Multiagent interaction models for building the networks of needs and opportunities in open systems. Automation and Remote Control. 2003;1:177-185. (in Russ.)]
11. Skobelev P.O. Mul'tiagentnye tekhnologii v promyshlennykh primenenyakh: k 20-letiyu osnovaniya

- Samarskoi nauchnoi shkoly mul'tiagentnykh sistem. Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie. 2010;12:33-46. [Skobelev P.O. Multiagent technologies in industrial applications: On the 20th anniversary of the founding of the Samara scientific school of multiagent systems. Mechatronics, Automation, Control. 2010;12:33-46. (in Russ.)]
12. Amelin K.S., Amelina N.O. i dr. Mul'tiagentnye tekhnologii. Razrabotka prilozhenii dlya mobil'nykh intellektual'nykh sistem na platforme Intel Atom. Sankt–Peterburg; 2012. 220 s. [Amelin K.S., Amelina N.O. et al. Multi-agent technologies. Development of applications for mobile intelligent systems based on the Intel Atom platform. Sankt–Peterburg; 2012. 220 p. (in Russ.)]
 13. Khyubner K. Istina mifa. M.: Respublika; 1996. [Khyubner K. The truth of the myth. M.: Respublika; 1996. (in Russ.)]
 14. Vittikh V.A. Ontologicheskie modeli situatsii v protsessa khprinyatiyakollegial'nykhreshenii. Trudy XI Mezhdunarodnoi konferentsii “Problemy upravleniya i modelirovaniya v slozhnykh sistemakh”. Samara: Samarskii nauchnyi tsentr RAN; 2009. S. 405-410. [Vittikh V.A. Ontological models of situations in the processes of making collegial decisions. Proceedings of the XI International Conference “Problems of Control and Modeling in Complex Systems”. Samara: Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences; 2009. P. 405-410. (in Russ.)]

Сведения об авторах:

Моисеева Татьяна Владимировна – кандидат экономических наук, доцент, ученый секретарь.
Поляева Наталья Юрьевна - студентка.

Information about the author.

Tatyana V. Moiseeva - Cand. Scie.(Economics), Assoc. Prof., Science Secretary.

Natalya Yu. Polyayeva - Student.

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
interest.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of

Поступила в редакцию 26.02.2018.

Принята в печать 30.04.2018.

Received 26.02.2018.

Accepted for publication 30.04.2018.

Для цитирования: Батаев Д. К.-С., Газиев М.А., Маилян Д.Р., Мажиев Х.Н. Трещиностойкость и долговечность преднапряженных стеновых панелей из ячеистых бетонов. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2018;45 (2):171-182 DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-2-171-182

For citation: Bataev D.K.-S., Gaziev M.A., Mailyan D.R., Mazhiev H.N. Crack resistance and durability of prestressed wall panels constructed from cellular concrete. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2018; 45 (2): 171-182. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-2-171-182

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

УДК 691.32

DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-2-171-182

ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ И ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ПРЕДНАПРЯЖЕННЫХ СТЕНОВЫХ ПАНЕЛЕЙ ИЗ ЯЧЕИСТЫХ БЕТОНОВ

Батаев Д.К.-С.², Газиев М.А.,⁴ Мажиев Х.Н.³, Маилян Д.Р.¹

¹Академия архитектуры и строительства Донского государственного технического университета,

¹344022, г. Ростов-на-Дону, ул. Социалистическая, 162, Россия,

²Комплексный научно – исследовательский институт РАН,
364051, г. Грозный, Старопромысловское шоссе, 21а, Россия,

²⁻⁴Грозненский государственный нефтяной технический университет
имени акад. М.Д. Миллионщикова,

364905, г. Грозный, проспект имени Х.А. Исаева, 100, Россия,

¹e-mail: dmailyn868@rambler.ru, ^{2,3}e-mail: kniiran@mail.ru, ⁴e-mail: mgaziev56@mail.ru

Резюме: Цель. Целью исследования является разработка способов, обеспечивающих повышение трещиностойкости и долговечности преднапряженных стеновых панелей из ячеистых бетонов. **Метод.** Комплексное исследование на стадии заводского изготовления двухмодульных газобетонных стеновых панелей с предварительно натянутыми стержнями из арматурной стали класса А-III, диаметром 10 мм, расположенными в середине толщины панелей в продольном и поперечном направлениях. **Результат.** Суммарные потери напряжений, в напрягаемых стержнях до заливки газобетонной смеси, связанные с релаксацией напряжений в арматуре, с деформациями оголовков напрягаемых стержней в захватных кулачках и стальной формы, а также потери после выхода панелей из автоклава при передаче усилия на бетон, составляют 15- 20% от начального уровня. Длина зоны передачи напряжения в пределах от 150 до 250 мм, в зависимости от размеров напрягаемых стержней. Изучение влияния предварительного обжата в бетоне на закрытие возможных технологических трещин в опытных панелях показали, что вследствие двухосного обжата бетона не только не появляются новые трещины при их работе на изгиб и растяжение (во время распалубки и транспортировки), но и закрываются начальные трещины, иногда появляющиеся при автоклавной обработке. **Вывод.** Сравнительные испытания преднапряженных и типовых панелей на кратковременную нагрузку согласно ГОСТ 8829-94 свидетельствуют о существенном повышении их жесткости и трещиностойкости, а также прочности на срез их перемычной части. Принятая для напрягаемых арматурных стержней конструкция концевой поперечной анкера в виде подковы, вместе с привязанными к ним плоскими сварными каркасами – лесенками из проволоки Вр-I диаметром 5 мм, установленные по контуру оконных проемов опытных панелей, обеспечивают надежное ее сцепление с ячеистым бетоном и качественную анкерровку в теле панели вплоть до ее разрушения. Двухосное преднапряженное армирование одиночными стержнями, в совокупности с типовым каркасным армированием, открывает возможности для производства наружных стеновых панелей из неавтоклавных ячеистых бетонов с обычной тепловой обработкой, взамен керамзитобетонных панелей.

Ключевые слова: стеновая панель, ячеистый бетон, технологические и усадочные трещины, преднапряженное армирование, потери напряжений, трещиностойкость, долговечность

TECHNICAL SCIENCE
BUILDING AND ARCHITECTURE

CRACK RESISTANCE AND DURABILITY OF PRESTRESSED WALL PANELS
CONSTRUCTED FROM CELLULAR CONCRETE

*Deni K.-S. Bataev*², *Minkail A. Gaziev*⁴, *Hasan N. Mazhiev*³, *Dmitriy R. Mailyan*¹

¹Don State Technical University, Academy of Architecture and Construction,

¹162 Sotsialisticheskaya Str., Rostov-on-Don 344022, Russia,

²Complex scientific research institute of the Russian Academy of Science,

²21a Staropromyslovskoe shosse, Grozny 364051, Russia,

²⁻⁴ M.D. Millionshchikov Grozny State Oil Technical University,

²⁻⁴100 Kh.A. Isayeva Ave., Grozny 364905, Russia,

¹e-mail: dmailyn868@rambler.ru, ^{2,3}e-mail: kniiran@mail.ru, ⁴e-mail: mgaziev56@mail.ru

Abstract Objectives The aim of the study is to develop ways to increase the crack resistance and durability of prestressed wall panels made of cellular concrete. **Method** A complex study was carried out at the stage of factory manufacturing of two-module, aerated concrete wall panels with prestressed rods of class A-III reinforcing steel, 10 mm in diameter, located in the middle of the panel in the longitudinal and transverse directions. **Results** It was found that the total stress losses in straining rods prior to casting of the aerated concrete mix, connected with stress relaxation in the reinforce and with deformations of the headings of the straining rods in the gripping jaws, the steel mould deformations, as well as the losses after the panel exit from the autoclave during the transfer of force to the concrete, are 15-20% of the initial level. At the same time, depending on the dimensions of the straining rods, the length of the strain transfer zone was in the range of 150 to 250 mm. A study of the effect of pre-compression on the closure of possible technological cracks in concrete test panels showed that, due to biaxial compression of concrete, new cracks do not appear when they work on bending and stretching (during the decking and transportation). Moreover, initial cracks that sometimes can appear during the autoclave processing become closed. **Conclusion** Comparative tests of prestressed and typical panels for short-term load in accordance with GOST 8829-94 requirements indicate a significant increase in their rigidity and crack resistance, as well as the shear strength of their bridge part. The design of straining reinforcing rods with the end transverse anchor in the form of a horse-shoe, together with attached flat welded frameworks made of Vr-I wire with a diameter of 5 mm, which are installed along the contour of the window openings of the test panels, ensure its reliable adhesion to cellular concrete and effective anchoring in the panel's body until the end of its useful life. Biaxial prestressed reinforcement by single rods in combination with conventional frame reinforcement opens up possibilities for the production of external wall panels from non-autoclaved cellular concrete with ordinary heat treatment, instead of ceramsite concrete panels.

Keywords: wall panel, cellular concrete, technological cracks, shrinkage cracks, prestressed reinforcement, stress loss, crack resistance, durability

Введение. В эксплуатационных условиях при влагообменных и карбонизационных процессах в ячеистобетонных стеновых панелях появляются усадочные трещины, которые могут стать началом разрушения структуры самого бетона, что приводит к интенсификации развития деструктивных процессов в бетоне и в стальной арматуре за счет ее коррозии, что и снижают их долговечность [1-5, 11-14].

Проблема повышения трещиностойкости крупногабаритных изделий из ячеистых бетонов является многоплановой, комплексной и решать ее надо не только технологическими приемами, но и при проектировании изделий, а также в период эксплуатации [1, 3, 12, 15-20].

Одним из путей повышения трещиностойкости и долговечности наружных стеновых панелей из автоклавных ячеистых бетонов является применение предварительно напряженной арматуры [1].

Необходимость дальнейшего развития производства крупногабаритных наружных стено-

вых конструкций с предварительным напряжением арматуры подвергается сомнению из-за технических трудностей заанкеривания арматуры в относительно малопрочном ячеистом бетоне, а также с возможными высокими потерями в арматуре на стадии их изготовления и от усадки и ползучести бетона в процессе их эксплуатации.

Однако, исследования, проведенные в 1970-1985 гг. в НИИЖБе, ЦНИСКе им. В.А.Кучеренко, Уральском ПромстройНИИпроекте и УПИ им. С.М. Кирова, показали, что предварительное напряжение арматуры в ячеистобетонных стеновых конструкциях не только эффективно повышает их жесткость и трещиностойкость, но и значительно уменьшает трудоемкость и себестоимость производства таких изделий [1,3,6].

Особое значение имеет надежность анкеровки арматуры в ячеистом бетоне. В конструкциях из обычного тяжелого бетона анкеровка преднапряженной арматуры обеспечивается в основном силами сцепления ее с бетоном. В автоклавных ячеистых бетонах эти силы недостаточны и анкеровка предварительно-напряженной арматуры должна обеспечиваться специальными мероприятиями.

В НИИЖБе и ЦНИСКе для повышения надежности анкеровки преднапряженной арматуры в изделиях из автоклавных ячеистых бетонов исследовали спирали и утолщенную цементно-полистерольную обмазку проволок, а также использовали для создания предварительного напряжения одиночные стержни из стали класса А-III и А-IIIв, располагаемые симметрично в два ряда по толщине панели с анкеровкой их с помощью шайб [7-10].

В Уральском ПромстройНИИпроекте была разработана система предварительно напряженного армирования для стеновых панелей из ячеистого бетона в виде отдельных плоских каркасов, со специальным устройством для предварительного натяжения, представляющее собой домкрат, крепящийся на форме стационарно или временно с помощью упорной втулки. В данном случае поперечные стержни каркасов служат анкерами для растянутой арматуры [3].

В УПИ им. Кирова предложили способ предварительно напряженного армирования наружных стеновых панелей из автоклавного газозолотона отдельными электротермически напрягаемыми стержнями, которые располагаются по середине толщины панели в одном или в двух направлениях. При этом на концах напрягаемых стержней высаживаются головки для закрепления их в захватных натяжных устройствах и привариваются поперечные анкера из обрезков арматурной стали [7].

Постановка задачи. Целью исследования является разработка способов, обеспечивающих повышение трещиностойкости и долговечности преднапряженных стеновых панелей из ячеистых бетонов.

В статье приводятся результаты комплексных исследований опытных предварительно напряженных газобетонных панелей, изготовленных на Пермском заводе силикатных панелей, в целях установления:

- фактических потерь напряжения в арматуре на стадии их изготовления, связанные с релаксацией напряжений в арматуре, с деформациями оголовков напрягаемых стержней в захватных кулачках и стальной формы, а также потери после выхода панелей из автоклава при передаче усилия на бетон;
- длины зоны передачи напряжений для преднапрягаемых одиночных стержней с концевыми криволинейными поперечными анкерами, а также в совокупности с привязанными к ним плоскими сварными каркасами – лесенками из проволоки $V_r - I$ диаметром 5 мм, которые устанавливаются по контуру оконных проемов;
- влияния предварительного обжата в бетоне на закрытие возможных технологических трещин в панелях, иногда появляющиеся на их поверхности при автоклавной обработке;
- влияния предварительного напряжения на прочность, жесткость и трещиностойкость опытных и контрольных панелей с типовым армированием при кратковременных испытаниях в соответствии с ГОСТ 8829-94, с оценкой несущей способности концевого анкера в теле бетона при нагрузках, близких к разрушающим.

Методы исследования. В ходе заводского изготовления опытных стеновых панелей из газобетона с предварительно напряжённой стержневой арматурой были определены основные виды потерь напряжения в арматуре, происходящие на этой стадии, которые в научно-технической литературе называют первыми потерями предварительных напряжений.

Для определения этих потерь были проведены следующие экспериментальные исследования. На борта стальной формы для панели типа Н-І-І-ІІ натягивали стержневую арматуру класса А-ІІІ диаметром 10 мм в продольном и поперечном направлениях. Схема армирования опытных газобетонных панелей с предварительно напряженным армированием показана на рис.1.

Натяжение стержневой арматуры производилось электротермическим способом, при этом величина напряжения для продольных стержней составляла 380-400 МПа, а для поперечных – 320-350 МПа.

Для закрепления стержневой напрягаемой арматуры на упорах форм применялись концевые анкера в виде оголовок из опрессованных в холодном состоянии шайб, изготовленных из стальных толстостенных труб.

Контроль напряжения в преднапрягаемой арматуре до заливки ячеистобетонной массы производился по абсолютному удлинению стержней, рассчитанному теоретически в предположении, что напряжение в них достигнуто соответствующей величины, а также для контроля осуществлялся переносным пружинным динамометром типа ПРД-6.

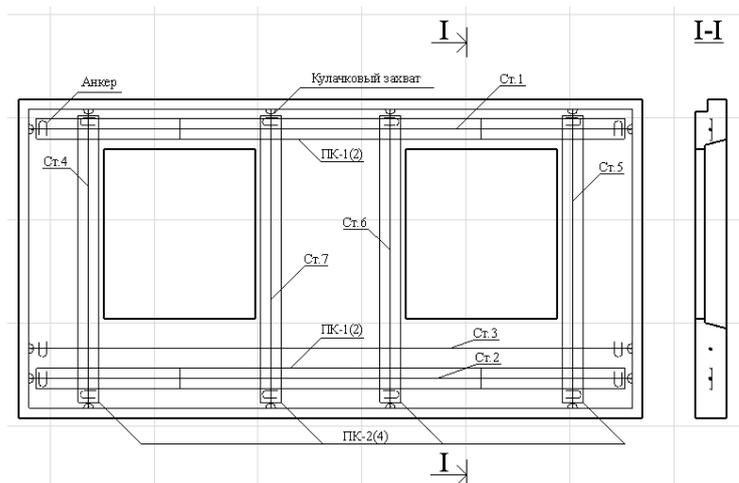


Рис.1. Схема установки напрягаемых стержней на борта формы и укладки плоских каркасов для опытной газобетонной панели: Ст. 1-7 – напрягаемые стержни – Ш10АІІІ; ПК-1(2)-2(4) – плоские каркасы 2 Ш 5 Вр-І+19ч30 Ш 4 Вр-1

Fig.1. Installation scheme of prestressed rods on the sides of the form and laying of flat frames for an experimental concrete panel: Art. 1-7 - tense rods - Ш10АІІІ; PC-1 (2) -2 (4) - flat frames 2 Ш 5 ВР-І + 19 ч 30 Ш 4 ВР-1

К потерям, происходящим в напрягаемых стержнях до заливки газобетонной смеси, относятся потери от релаксации напряжений в арматуре и деформации опрессованных оголовок напрягаемых стержней в захватных кулачках, а также от деформации стальной формы при её перестановке по заводской технологической линии.

Для определения этих потерь опытную форму с преднапряженными стержнями, после их натяжения, выдерживали в течение 3,5 часа, затем перемещали на различные посты с помощью мостового крана. При этом измерения напряжений в предварительно-напряженных одиночных стержнях производились с помощью переносного динамометра ПРД-6. Величины потерь в процентах от уровня начальных напряжений в исследуемых стержнях представлены на рис.2.

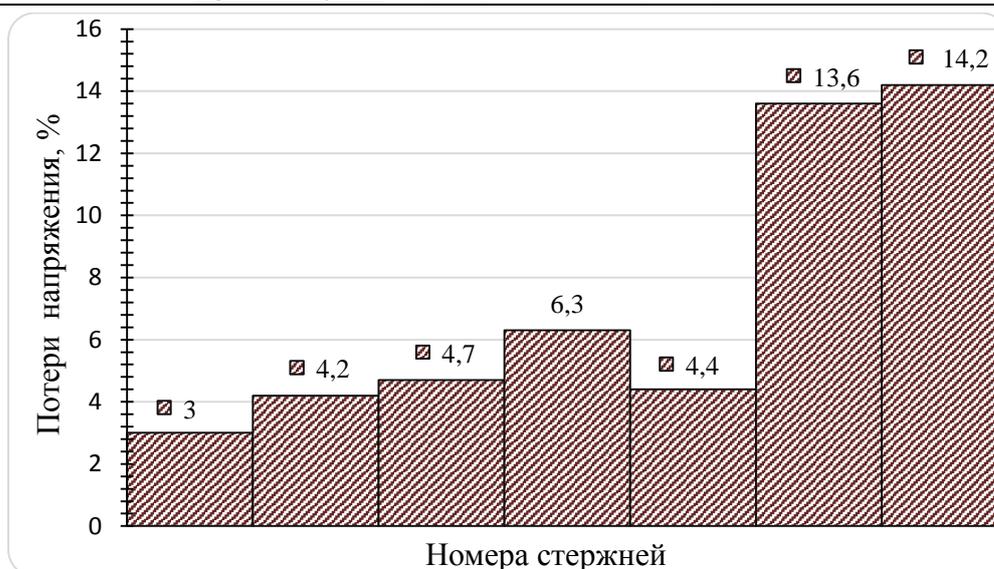


Рис. 2. Потери предварительных напряжений в арматурных стержнях до заливки газобетонной смеси

Fig. 2. Loss of prestressing in rebars before pouring aerated concrete mixture

В среднем величины потерь от уровня начальных напряжений в трех стержнях длиной 6м., напрягаемых на короткие борта, составили 3,6 % (12, 1 МПа), а в стержнях длиной 2,8 м (Ст. 4-7), напрягаемых на длинные борта, эти потери составили 9,6 % (31,4 МПа). Наибольшие потери (14 % или 46 МПа) были обнаружены в коротких стержнях под № 6 и 7. Формование и автоклавная обработка опытных преднапряженных газобетонных панелей производились в соответствии с принятой на Пермском заводе силикатных панелей технологией.

Для приготовления газобетона на смешанном вяжущем плотностью 600кг/м³ класса В2,5 использовались:

- портландцемент Пашийский М400 с добавкой гранулированного шлака до 15%;
- известь Чусовского карьера с примесью Пашийской с удельной поверхностью помола $S=4500$ см²/г, температурой гашения 52С, с содержанием активных СаО+MgO-60%;
- кварцевый песок Пролетарского месторождения с удельной поверхностью помола $S=2590$ см²/г.

Автоклавная обработка газобетона осуществлялась по режиму: подъем давления 2 часа, изотермическая выдержка при давлении 0,8 МПа- 8часов и снижение давления- 4 часа.

К потерям, происходящим в арматуре на стадии изготовления панелей, относятся также потери при отпуске натяжения во время распалубки панелей после выхода их из автоклава (потери при передаче усилия на бетон).

Для установки приборов при определении потерь преднапряжения в арматуре при отпуске натяжения были закреплены на напрягаемые стержни под № 1,3, 5 и 7, до заливки газобетонной смеси, пенопластовые плитки размерами 100х250х150мм для образования окошек в бетоне.

Схема расположения данных окошек для установки тензометров Гугенбергера при замере потерь напряжения в длинных и коротких напрягаемых стержнях показана на рис.3. Рычажные тензометры были установлены на арматурных стержнях при помощи специальных удлинителей и крепежных элементов на базе 150 мм, отсчеты снимались сразу же после отпуска натяжения, а затем по истечении 30 мин.

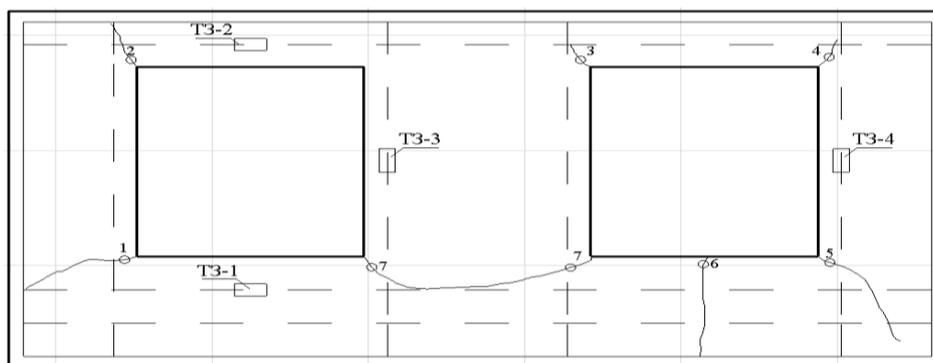


Рис. 3. Схема установки приборов для оценки потерь в стержнях при передаче усилия на бетон и замера ширины раскрытия технологических трещин: 1ч7- номера трещин с местами для замера их величины; Т3-1ч Т3-4-тензометры Гугенберга

Fig. 3. Scheme of installation of instruments for estimating losses in the rods during the transfer of effort to concrete and measuring the width of the opening of technological cracks: 1 ч 7 are the numbers of cracks with places to measure their size; Т3-1 ч Т3-4 Huguenberger strain gauges

Обсуждение результатов. Исследования показали, что величина потерь преднапряжения в арматуре при передаче усилия на бетон составили для стержней продольного направления 22 МПа, а для стержней поперечного направления в среднем – 6 МПа. После выдержки в течение 30 мин. эти значения выросли соответственно до 30 МПа и 8МПа.

В ходе проводимых исследований также измеряли длину зоны анкеровки преднапряженной арматуры и величину обжатия ячеистого бетона с помощью индикаторов часового типа с ценой деления 0,01мм. Группа приборов для измерения длины зоны анкеровки арматуры устанавливалась на базе 200мм цепочкой вдоль двух поперечных и продольных напрягаемых стержней под №-ми 1,3 и 5,7. Крайний в цепочке прибор устанавливался в 100мм от торца панели.

Обжатие бетона измерялось на базе 500 мм в средней части (в простенке между проемами окон) панели с помощью переносного деформометра в двух взаимно-перпендикулярных направлениях. Измерения показали, что после передачи усилия предварительного напряжения относительные деформации газобетона составляли соответственно в поперечном и продольном направлении в пределах $0,18-0,20 \cdot 10^{-3}$, а величина длины зоны анкеровки арматуры 150-250 мм.

Опытные панели были армированы одиночными предварительно напрягаемыми стержнями диаметром 10 мм из арматуры класса А-III в двух направлениях – продольном и поперечном.

Для исключения проскальзывания арматуры при отпуске натяжения и обеспечения дополнительной анкеровки, к концам продольных напрягаемых стержней приваривали поперечные, гнутые в виде подковы, анкера длиной 150 мм из тех же арматурных стержней. Для фиксации напрягаемой арматуры используют специальные кулачковые захваты, закрепляемые на откидных бортах форм.

Торцевой упор захватного устройства входит вовнутрь формы на 2-3 см, что позволяет закреплять в нем напрягаемый стержень так, чтобы он не выступал после распалубки за габариты изделия. Стержни до натяжения, также, как и другие арматурные детали, окунали в ванну с цементно-казеиновой антикоррозионной обмазкой.

В четвертях оконных проемов и в перемычках панелей была установлена конструктивная арматура в виде однотипных сварных плоских каркасов, а у боковых торцевых граней – в виде гнутых сеток, изготовленных из арматурной проволоки класса Вр-I, причем продольные стержни имели диаметр 5мм, а поперечные – 4 мм с шагом 100-200 мм.

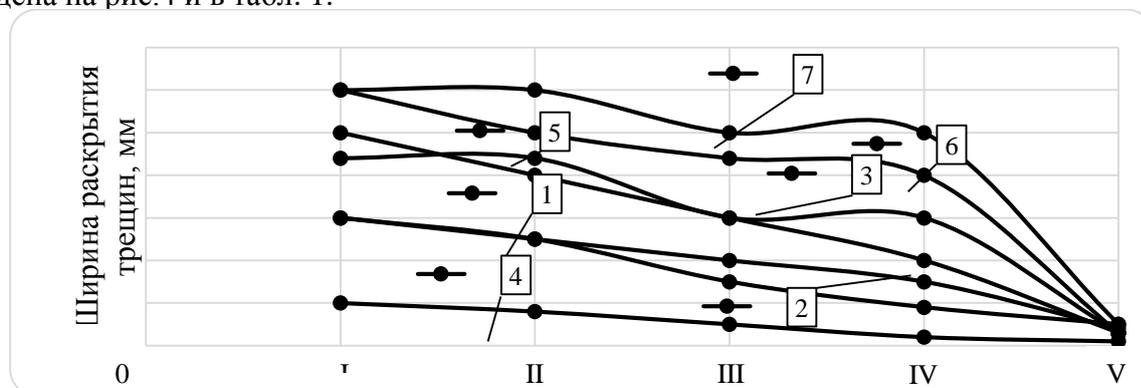
В ходе исследований, с целью специального изучения эффекта влияния предварительно напряженного армирования на закрытие возможных начальных технологических трещин, иногда появляющиеся при автоклавной обработке, было осуществлено наблюдение за развитием

трещин в опытной панели, армированной только лишь одиночными преднапряженными стержнями с концевыми анкерами и с усиленными подъемными петлями, в которой образовались наибольшее количество трещин с шириной раскрытия более 0,2 мм.

Для оценки динамики дальнейшего развития данных трещин осуществлялся замер их ширины на поверхности панели отсчетным микроскопом типа МПБ-2 (увеличение 1:24) на следующих V-ти этапах, а именно:

- до передачи усилия обжатия на бетон;
- после отпуска продольных стержней;
- после отпуска поперечных стержней;
- после выдержки 0,5–1 часа;
- после подъема панели из формы с установкой в вертикальное положение и подвеской на посту отделки.

При выходе из автоклава данная преднапряженная двухмодульная стеновая панель имела семь трещин разной длины и направлений, ширина раскрытия которых колебалась от 0,05 до 0,3 мм. Характер расположения технологических трещин в опытной панели показан на рис.3, а динамика их развития на определенных этапах их замеров приведена на рис.4 и в табл. 1.



Этапы замеров трещин

Рис.4. Динамика развития возможных технологических трещин в опытной панели до и после передачи усилия обжатия на бетон на различных этапах их замеров: 1ч7 - №№ трещин на рис.3.

Fig.4. Dynamics of development of possible technological cracks in the experimental panel before and after the transfer of the compression force to concrete at various stages of their measurements: 1 ч 7 - crack number № in Fig. 3

Этапы замеров:

I – до передачи усилий обжатия;

II и III после отпуска продольных и поперечных стержней соответственно;

IV – после выдержки 0,5 часа;

V – после подъема панели из формы с установкой в вертикальное положение, затем подвеской на посту отделки.

После отпуска продольных и поперечных преднапряженных стержней и при последующей выдержке от 0,5 до 1 часа ширина большинства технологических трещин на поверхности газобетонной панели уменьшилась в 1,5-10 раза, при этом трещины под условными № 1,2 и 4 закрылись полностью.

После подъема панели из формы мостовым краном и с установкой ее в вертикальное положение, а затем подвеской на посту отделки закрылись и другие трещины и остались заметными лишь те, которые имели ранее ширину раскрытия в пределах 0,25–0,30 мм (рис.4 и табл.1)

Таблица 1. Развитие возможных технологических трещин в газобетонных панелях типа Н-1-1-П с преднапряженным армированием
Table 1. Development of possible technological cracks in aerated concrete panels type Н-1-1-Р with prestressed reinforcement

№№ трещин (см. рис. 3)	Количество делений / ширина трещин, мм				
	№№ этапов (см. рис.4)				
	1	2	3	4	5
1	$\frac{3}{0,15}$	$\frac{2,5}{0,125}$	$\frac{2}{0,1}$	$\frac{1,5}{0,075}$	$\frac{0,4}{0,02}$
2	$\frac{3}{0,15}$	$\frac{2,5}{0,125}$	$\frac{1,5}{0,075}$	$\frac{1,3}{0,045}$	$\frac{0,5}{0,025}$
3	$\frac{4,4}{0,22}$	$\frac{4,4}{0,22}$	$\frac{3}{0,15}$	$\frac{3}{0,15}$	$\frac{0,3}{0,015}$
4	$\frac{1}{0,05}$	$\frac{0,8}{0,04}$	$\frac{0,5}{0,025}$	$\frac{0,2}{0,01}$	$\frac{0,1}{0,005}$
5	$\frac{5}{0,25}$	$\frac{4}{0,2}$	$\frac{3}{0,15}$	$\frac{2}{0,1}$	$\frac{0,3}{0,015}$
6	$\frac{6}{0,3}$	$\frac{5}{0,25}$	$\frac{4,5}{0,225}$	$\frac{4}{0,2}$	$\frac{0,3}{0,015}$
7	$\frac{6}{0,3}$	$\frac{6}{0,3}$	$\frac{5}{0,25}$	$\frac{5}{0,25}$	$\frac{0,5}{0,025}$

Экспериментальные газобетонные наружные стеновые панели с комбинированным преднапряженным и конструктивным армированием (рис.1), а также, для сравнительной оценки, и контрольные панели типа Н-1-1-П для жилых домов серии Э-600п с объемно-каркасным армированием, были испытаны в соответствии с требованиями ГОСТ 8829 -94 нагружением на прочность, жесткость и трещиностойкость, которые обычно проводят перед началом их массового изготовления и при изменении их армирования или конструктивных решений. Стеновые панели при испытании устанавливали на силовой стенд в проектом (рабочем) положении, согласно статической схемы их работы (как самонесущие на высоту здания) в жилом 12-ти этажном доме (рис.5).

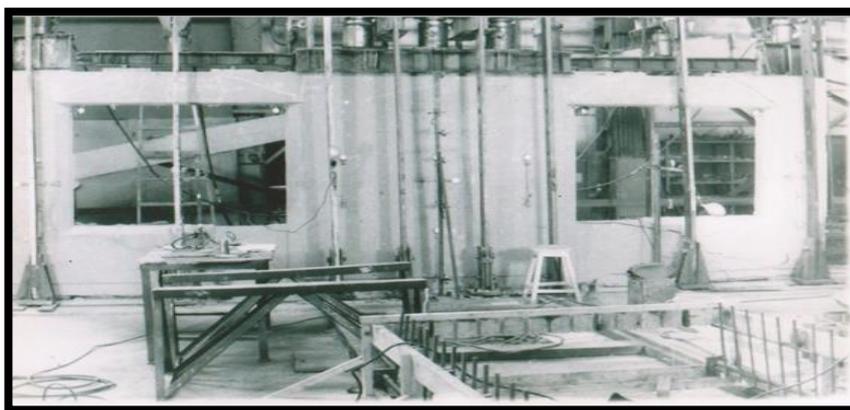


Рис.5. Общий вид опытной панели на силовом стенде во время испытаний
Fig.5. General view of the experimental panel on the power stand during testing

Вертикальная нагрузка создавалась с помощью семи гидродомкратов с усилиями от 2,5 до 5,0 тс, которая передавалась на панели в виде равномерно распределенной нагрузки через жесткие стальные траверсы и контролировалась по манометру насосной станции.

Загружение панелей производили вертикальной нагрузкой за пять этапов до нормативной или расчетной ее величины и, после получасовой выдержки, продолжали дальнейшие испытания вплоть до ее разрушения.

В промежутках между этапами нагрузки снимали показания с измерительных приборов,

производили визуальный осмотр поверхности испытуемой панели и фиксировали появление и раскрытие силовых трещин. В процессе испытаний измеряли индикаторами часового типа с ценой деления 0,01мм продольные и поперечные деформации газобетона в средней части по высоте и ширине простенков панелей на базе 400 и 300мм соответственно, а также деформации сдвига зон сопряжения переемычки с простенками.

Прогибы переемычек измеряли с помощью прогибомеров системы Максимова с точностью 0,01мм, которые были установлены в середине их пролетов.

Образование и раскрытие трещин фиксировалось отсчетным микроскопом типа МПБ-2 с 24- кратным увеличением. В процессе испытания на торцевых участках опытных панелей также производились с помощью парных индикаторов с точностью 0,01 мм измерения для определения возможного смещения трех предварительно напряженных продольных стержней с концевыми анкерами относительно бетона.

Фрагменты характерных разрушений в различных зонах экспериментальных панелей из газобетона с преднапряженным армированием, после доведения их в процессе испытания до разрушения, показаны на рис.6.

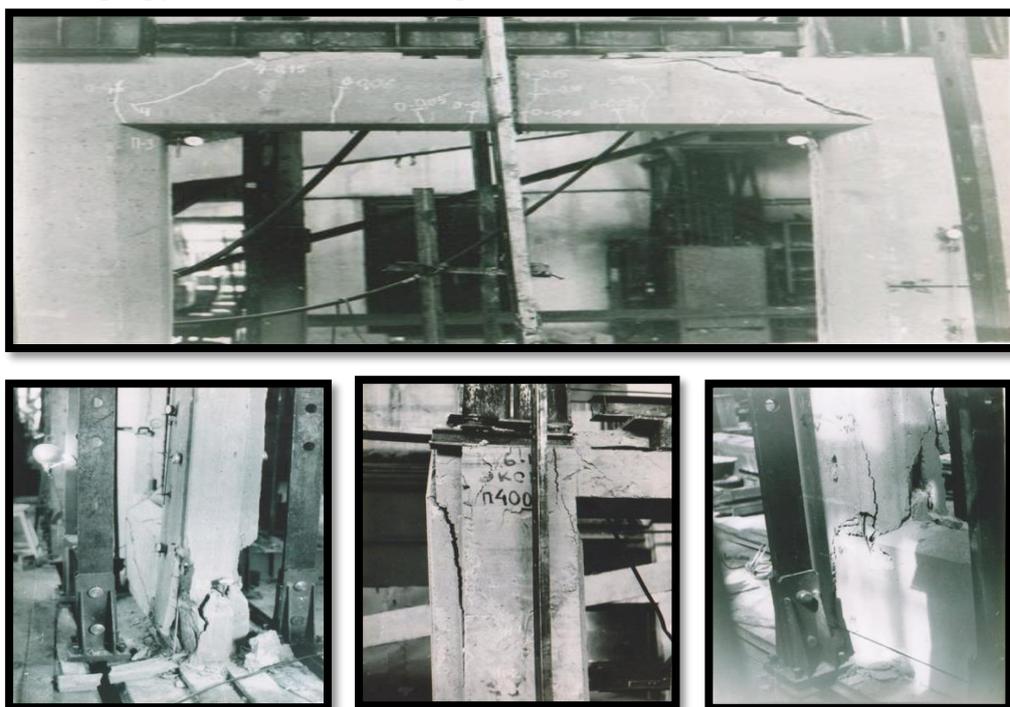


Рис.6. Фрагменты характерных разрушений в разных участках опытных панелей
Fig.6. Fragments of characteristic damage in different parts of the experimental panels

Экспериментальные испытания данных панелей кратковременной нагрузкой

Исследования показали, что ширина раскрытия силовых трещин у панелей с преднапряженным армированием при нормативной нагрузке в 1,5-2 раза меньше, чем у панелей с обычным объемно-каркасным армированием.

Отношение фактического прогиба к контрольному при нормативной нагрузке у панелей с напряженным армированием составило 0,6-0,8, а у обычных серийных панелей- 0,95-1,05. При статических испытаниях силовые трещины шириной раскрытия 0,2 мм на преднапряженных панелях появились при нагрузках, превышающих расчетные. У контрольных панелей с обычным типовым армированием такие же трещины появлялись при нагрузках, составляющих 0,4-0,5 от расчетных. Деформации сжатия бетона в простенках панелей как с обычной, так и с предварительно напряженной арматурой были весьма близки друг другу и составляли на последних этапах загрузки величины порядка $1,2 - 1,4 \times 10^{-3}$.

Как уже указывалось, в ходе испытания опытных панелей производилось измерение смещения предварительно напряженной арматуры относительно бетона. До момента полного разрушения панелей сдвига арматуры обнаружено не было, что свидетельствует о достаточно

надежном сцеплении предварительно напряженной арматуры с автоклавным газобетоном и качественной ее анкеровке в теле бетона.

Вывод. Результаты исследования позволяют сформулировать следующее:

1. Применение в наружных стеновых панелях из автоклавного газобетона предварительно напряженного армирования в виде натянутых в двух направлениях одиночных стержней из арматуры периодического профиля диаметром 10мм класса А-III с опрессованными головками и приваренными к ним, гнутыми в виде подковы, концевыми анкерами, позволяют существенно повысить их трещиностойкость на стадии изготовления с одновременным снижением расхода арматуры и затрат на арматурные работы по сравнению с панелями с типовым каркасным армированием.

2. Установлено, что суммарные потери напряжений, происходящие в поперечных и продольных напрягаемых стержнях для преднапряженных панелей до заливки газобетонной смеси, связанные с релаксацией напряжений в арматуре, с деформациями опрессованных оголовков напрягаемых стержней в захватных кулачках и стальной формы при её перестановке по заводской технологической линии, а также потери при передаче усилия на бетон после выхода опытных панелей из автоклава, составляют в среднем 15- 20% от первоначальной ее величины.

3. Изучение влияния предварительного обжатия в бетоне на закрытие возможных к появлению при автоклавной обработке на поверхности газобетонной панели технологических трещин показало, что после отпуска поперечных и продольных преднапряженных стержней для передачи усилия на бетон и при последующей выдержке от 0,5 до 1 часа, ширина большинства из этих трещин уменьшилась в 1,5-10 раза и находилась в пределах от 0,005 до 0,025мм, а длина зоны передачи напряжения составила для одиночных стержней с концевыми анкерами в пределах от 150 до 250 мм, в зависимости от размеров напрягаемых стержней.

4. Результаты испытания силовой нагрузкой, согласно требованиям ГОСТ 8829-94 на прочность, жесткость и трещиностойкость опытных преднапряженных и контрольных типовых панелей с объемно-каркасным армированием, свидетельствуют о том, что предварительное напряжение значительно повышает их трещиностойкость и жесткость. При этом, принятая конструкция концевого поперечного анкера в виде подковы для напрягаемых арматурных стержней, в совокупности с привязанными к ним плоскими сварными каркасами – лесенками из проволоки Вр – I диаметром 5 мм, которые устанавливаются по контуру оконных проемов опытных панелей, обеспечивает надежное ее сцепление с ячеистым бетоном и качественную анкерровку в теле панели вплоть до ее разрушения.

Библиографический список:

1. Силаенков Е.С. Долговечность изделий из ячеистых бетонов. М.: Стройиздат, 1986. – 176 с.
2. Батаев Д.К.-С., Газиев М.А., Пинскер В.А., Чепурненко А.С. Теория расчета усадочных напряжений в ячеистобетонных стеновых панелях при карбонизационных процессах с учетом ползучести // Вестник МГСУ. 2016. № 12. С. 11-22.
3. Газиев М.А. Эмпирический метод расчета влажностно -карбонизационных напряжений в панелях из ячеистого бетона с учетом его реологических свойств // Строительные материалы. 2018. №3. С.75-79.
4. Куршпель В.Х., Макаричев В.В., Филиппов В.П. Стеновые панели из ячеистого бетона с преднапряженным армированием // Бетон и железобетон. 1986. №12. – С. 7-8.
5. Макаркин С.В., Каширский Ю.А. Технологичные анкера для анкеровки арматуры в ячеистом бетоне // Долговечность конструкций из автоклавных бетонов. – Таллин. – 1987. - ч. II.- С. 176-179.
6. Силаенков Е.С. Урал – опорный край ячеистого бетона в Российской Федерации // Строительные материалы, 2005. №1. – С. 12-17.
7. Силаенков Е.С., Кантор С.Л., Газиев М.А. Учет ползучести бетона вследствие карбонизации при расчете напряженного состояния ячеистых стеновых панелей // Долговечность конструкций из автоклавных бетонов. – Таллин. – 1987. – ч. I. – С. 160-163.
8. Хлебцев В.П., Трамбовецкий В.П. Исследование несущей способности стеновых панелей из ячеистых бетонов с обычной и предварительно напряженной арматурой // Прочность крупнопанельных каменных конструкций. – М.: Стройиздат, 1972. -С.145-154.
9. Куршпель В.Х., Лобастов В.М. Исследование потерь напряжения в арматуре стеновых панелей // Долговечность конструкций из автоклавных бетонов. - Таллин. - 1987. – ч. II.-С. 173-175.

10. Батаев Д.К.-С., Газиев М.А., Пинскер В.А. Опыт исследования и внедрения преднапряженных стеновых панелей из автоклавных ячеистых бетонов // Опыт производства и применения ячеистого бетона автоклавного твердения: Материалы 9-й Международной научно-научно-практической конференции. Минск: Колорград, 2016. – С.83-85.
11. Баженов Ю.М., Батаев Д.К.-С. Материалы и технологии для восстановительных работ в строительстве. – М.: «КОМТЕХ», 2000. – 234 с.
12. Силаенков Е.С., Батаев Д.К.-С., Мажиев Х.Н., Газиев М.А. Повышение долговечности конструкций и изделий из мелкозернистых ячеистых бетонов при эксплуатационных воздействиях. – Грозный, 2015. – 368 с.
13. Мажиев Х.Н., Батаев Д.К.-С., Газиев М.А., Мажиев К.Х., Мажиева А.Х. Материалы и конструкции для строительства и восстановления зданий и сооружений в сейсмических районах. – Грозный, 2014. – 652 с.
14. Айзенберг Я.М., Мажиев Х.Н., Батаев Д.К.-С., Батдалов М.М., Муртазаев С.-А.Ю. Материалы и конструкции для повышения сейсмостойкости зданий и сооружений. М: «Комтех-Принт», 2009г. – 447 с.
15. Beres L. Shrinkage and Creep of Cellular Concrete, Concrete Building and Concrete Products, Sept., 1968, s. 25-29.
16. Vasicek I. Trvanlivost a odolnost autoklavovanych porovitych betonu pri posobeni susnych Vnejsich jena. - Stavivo, 1965, N6, p. 136-149.
17. Kruml F. Influence of saturation degree of autoclaved aerated concretes on their creep, Autoclaved Aerated Concretes, moisture and Properties, Netherlands, 1983, s. 249-256.
18. Матошлек М., Мишковský I. Pusěvek k Trvanlivosity některých porobetonových staved. Sbornik VUT v brně, 1971, N1-4, s. 301-307.
19. Haust Y., Alou F., Wittmann F. Influence of moisture Content of Mechanical Properties of Autoclave Aerated Concrete, Autoclaved Aerated Concrete, moisture and Properties Netherlands, 1983, s. 219-233.
20. Schaffler H., Druckfestigkeit von dampfgehartetem Casbeton nach, verschidener lagerung. - In: Lightweight Concrete / RILEM, Gütteborg, 1961, p 62-78.

References:

1. Silaenkov E.S. Dolgovechnost' izdelii iz yacheistykh betonov. M.: Stroizdat, 1986. 176 s. [Silaenkov E.S. Durability of products from cellular concrete. M.: Stroizdat, 1986. 176 p. (in Russ.)]
2. Bataev D.K.-S., Gaziev M.A., Pinsker V.A., Chepurnenko A.S. Teoriya rascheta usadochnykh napryazhenii v yacheistobetonnykh stenovykh panelyakh pri karbonizatsionnykh protsessakh s uchetom polzuchesti. Vestnik MGSU. 2016;12:11-22. [Bataev D.K.-S., Gaziev M.A., Pinsker V.A., Chepurnenko A.S. Theory of calculation of shrinkage stresses in cellular concrete wall panels during carbonation processes taking creep into account. Vestnik MGSU. 2016;12:11-22. (in Russ.)]
3. Gaziev M.A. Empiricheskii metod rascheta vlazhnostno -karbonizatsionnykh napryazhenii v panelyakh iz yacheistogo betona s uchetom ego reologicheskikh svoystv. Stroitel'nye materialy. 2018;3:75-79. [Gaziev M.A. An empirical method for calculating moisture-carbonization stresses in panels of cellular concrete, taking into account its rheological properties. Construction Materials. 2018;3:75-79. (in Russ.)]
4. Kurshpel' V.Kh., Makarichev V.V., Filippov V.P. Stenovye paneli iz yacheistogo betona s prednapryazhennym armirovaniem. Beton i zhelezobeton. 1986;12:7-8. [Kurshpel' V.Kh., Makarichev V.V., Filippov V.P. Wall panels of cellular concrete with prestressed reinforcement. Beton i zhelezobeton. 1986;12:7-8. (in Russ.)]
5. Makarkin S.V., Kashirskii Yu.A. Tekhnologichnye ankery dlya ankerovki armatury v yacheistom betone. Dolgovechnost' konstruksii iz avtoklavnykh betonov. Ch. II. Tallin. 1987. S. 176-179. [Makarkin S.V., Kashirskii Yu.A. Technological anchors for anchoring the reinforcement in cellular concrete. Durability of structures made of autoclave concrete. Part II. Tallin. 1987. P. 176-179. (in Russ.)]
6. Silaenkov E.S. Ural – opornyi kraj yacheistogo betona v Rossiiskoi Federatsii. Stroitel'nye materialy. 2005;1:12-17. [Silaenkov E.S. Ural - the stronghold of cellular concrete in the Russian Federation. Construction Materials. 2005;1:12-17. (in Russ.)]
7. Silaenkov E.S., Kantor S.L., Gaziev M.A. Uchet polzuchesti betona vsledstvie karbonizatsii pri raschete napryazhennogo sostoyaniya yacheistykh stenovykh panelei. Dolgovechnost' konstruksii iz avtoklavnykh betonov. Ch. I. Tallin. 1987. S. 160-163. [Silaenkov E.S., Kantor S.L., Gaziev M.A. Consideration of concrete creep due to carbonation in the calculation of stress state of cellular wall panels. Durability of structures made of autoclave concrete. Part I. Tallin. 1987. S. 160-163. (in Russ.)]
8. Khlebtsev V.P., Trambovetskii V.P. Issledovanie nesushchei sposobnosti stenovykh panelei iz yacheistykh betonov s obychnoi i predvaritel'no napryazhennoi armaturoi. Prochnost' krupnopanel'nykh kamennykh konstruksii. M.: Stroizdat; 1972. S.145-154. [Khlebtsev V.P., Trambovetskii V.P. Investigation of the bearing capacity of wall panels made of cellular concrete with conventional and prestressed reinforcement. Strength of large-panel stone structures. M.: Stroizdat; 1972. P.145-154 (in Russ.)]
9. Kurshpel' V.Kh., Lobastov V.M. Issledovanie poter' napryazheniya v armature stenovykh panelei. Dolgovechnost' konstruksii iz avtoklavnykh betonov. Tallin. 1987. Ch. II. S. 173-175. [Kurshpel' V.Kh., Lobastov V.M. Investigation of voltage losses in the reinforcement of wall panels. Durability of structures from autoclave concrete. Tallin. 1987. Part II. P. 173-175. (in Russ.)]

10. Bataev D.K-S., Gaziev M.A., Pinsker V.A. Opyt issledovaniya i vnedreniya prednapryazhennykh stenovykh panelei iz avtoklavnykh yacheistykh betonov. Materialy 9-i Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Opyt proizvodstva i primeneniya yacheistogo betona avtoklavnogo tverdeniya". Minsk: Kolorgrad; 2016. S.83-85. [Bataev D.K-S., Gaziev M.A., Pinsker V.A. Experience of research and introduction of prestressed wall panels from autoclaved cellular concrete. Materials of the 9th International Scientific and Practical Conference "Experience in the production and application of autoclaved cellular aerated concrete". Minsk: Kolorgrad; 2016. P.83-85. (in Russ.)]
11. Bazhenov Yu.M., Bataev D.K-S. Materialy i tekhnologii dlya vosstanovitel'nykh rabot v stroitel'stve. M.: "KOMTEKh"; 2000. 234 s. [Bazhenov Yu.M., Bataev D.K-S. Materials and technologies for restoration work in construction. M.: "KOMTEKh"; 2000. 234 p. (in Russ.)]
12. Silaenkov E.S., Bataev D.K-S., Mazhiev Kh.N., Gaziev M.A. Povyshenie dolgovechnosti konstruksii i izdelii iz melkozernistykh yacheistykh betonov pri ekspluatatsionnykh vozdeistviyakh. Groznyi; 2015. 368 s. [Silaenkov E.S., Bataev D.K-S., Mazhiev Kh.N., Gaziev M.A. Increasing the durability of structures and products from fine-grained cellular concrete under operational influences. Groznyi; 2015. 368 p. (in Russ.)]
13. Mazhiev Kh.N., Bataev D.K-S., Gaziev M.A., Mazhiev K.Kh., Mazhieva A.Kh. Materialy i konstruksii dlya stroitel'stva i vosstanovleniya zdaniy i sooruzhenii v seismicheskikh raionakh. Groznyi; 2014. 652 s. [Mazhiev Kh.N., Bataev D.K-S., Gaziev M.A., Mazhiev K.Kh., Mazhieva A.Kh. Materials and structures for construction and restoration of buildings and structures in seismic regions. Groznyi; 2014. 652 p. (in Russ.)]
14. Aizenberg Ya.M., Mazhiev Kh.N., Bataev D.K-S., Batdalov M.M., Murtazaev S - A. Yu. Materialy i konstruksii dlya povysheniya seismostoikosti zdaniy i sooruzhenii. M.: "Komtekh-Print", 2009. 447 s. [Aizenberg Ya.M., Mazhiev Kh.N., Bataev D.K-S., Batdalov M.M., Murtazaev S - A. Yu. Materials and structures for increasing seismic resistance of buildings and structures. M.: "Komtekh-Print", 2009. 447 p.(in Russ.)]
15. Beres L. Shrinkage and Creep of Cellalar Concrete, Concrete Building and Concrete Products. Sept. 1968.P. 25-29.
16. Vasicek I. Trvanlivost a odolnost avtoklavovovanykh porovitych betonu pri posobeni susnykh Vnejsich jena. Stavivo.1965;6:136-149.
17. Kruml F. Influence of saturation degree of autoclaved aerated concretes on their creep. Autoclaved Aerated Concretes, moisture and properties. Nethelands; 1983.P. 249-256.
18. Матошлєк М., Мильковскэ I. Pusěvek.K. Trvanlivosity některych porobetonových staved. Sbornik VUT v Brně. 1971;1-4:301-307.
19. Haust Y., Alou F., Wittmann F. Infuence of moisture content of mechanical properties of autoclave aerated concrete. Autoclaved Aerated Concrete, moisture and properties. Netherlands; 1983.P. 219-233.
20. Schaffler H. Druckfestigkeit von dampfgehartetem Gasbeton nach, vershildener lagerung. Lightweight Concrete. Gцtтеborg: RILEM; 1961. P 62-78.

Сведения об авторах:

Батаев Дени Карим-Султанович - доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой экспертизы, управления недвижимостью и теплогазоснабжения.

Мажиев Хасан Нажоевич - доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой строительных конструкций.

Маилян Дмитрий Рафаэлович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой железобетонных и каменных конструкций.

Газиев Минкаил Ахметович-кандидат технических наук, доцент кафедры строительных конструкций.

Information about the authors.

Deni K.-S Bataev. - Dr. Sci. (Technical), Prof., Department of Expertise, Property Management and Heat and Gas Supply.

Hasan N. Mazhiev - Dr. Sci. (Technical), Prof., Department of Building Structures.

Dmitriy R. Mailyan - Dr. Sci. (Technical), Prof., Department of Reinforced Concrete and Stone Structures.

Minkail A. Gaziev - Cand. Dr. Sci. (Technical), Assoc. Prof., Department of Building Structures.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 14.03.2018.

Принята в печать 25.04.2018.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 14.03.2018.

Accepted for publication 25.04.2018

Для цитирования: Богатина А.Ю., Моргун В.Н., Моргун Л.В. О способе управления структурно-механическими свойствами пенобетонных смесей. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2018;45 (2):183-190 DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-2-183-190
For citation: Bogatina A.Yu., Morgun V.N., Morgun L.V. Method for managing the structural-mechanical properties of foam concrete mixtures. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2018; 45 (2): 183-190. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-2-183-190

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

УДК 691.3

DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-2-183-190

О СПОСОБЕ УПРАВЛЕНИЯ СТРУКТУРНО-МЕХАНИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ ПЕНОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ

Богатина А.Ю.³, Моргун В.Н.², Моргун Л.В.¹

¹⁻³Донской государственный технический университет,

¹⁻³344000, пл. Гагарина, 1, Ростов-на-Дону, Россия,

¹e-mail: konst-lvm@yandex.ru, ²e-mail: vnmorgun@sfedu.ru, ³e-mail: ips@rgups.ru

Резюме: *Цель.* В настоящее время возрастает актуальность научно-исследовательских работ, направленных на снижение материалоемкости строительных конструкций. Поскольку пенобетоны доказали свою эффективность в качестве материалов для изготовления стеновых конструкций, то целью настоящей работы явилось развитие научных представлений об особенностях формирования их макроструктуры на этапе фазового перехода «из вязкого в твердое». **Метод.** Оценка пластической прочности осуществлялась по патенту на изобретение № 2316750 («Способ определения пластической прочности пенобетонной смеси», зарегистрированном в государственном реестре изобретений РФ 10.02.2008). В качестве пенообразователей применяли синтетический ПО-ЗНП по ТУ 38-00-058079999-20-93 и аналог клееканифольного «Ареком-4» по ТУ 31-10. Контроль кинетики пластической прочности исследуемых равноплотных смесей осуществляли в пятилитровых сосудах с интервалом 15 минут в течение трех часов. **Результат.** В работе рассмотрены важнейшие особенности массопереноса, управляющие формированием меры дефектности межпоровых перегородок в пенобетонах. Из анализа теоретических и экспериментальных данных следует, что соотношение между расходом воды и ПАВ является важнейшим инструментом управления качеством пенобетонных смесей. Установление оптимального рецептурного соотношения между расходом воды и количеством пенообразователя позволяет максимальному количеству ПАВ находиться на границе раздела фаз "газ-жидкость" и, таким образом, обеспечивать минимальную дефектность структуры межпоровых перегородок в затвердевшем бетоне. **Вывод.** Выполненные теоретические и экспериментальные исследования позволяют считать соотношение между расходом воды и ПАВ важным инструментом управления величиной структурно-механических свойств в пенобетонных смесях.

Ключевые слова: пенобетонная смесь, пластическая прочность, коалесценция

TECHNICAL SCIENCE
BUILDING AND ARCHITECTURE

METHOD FOR MANAGING THE STRUCTURAL-MECHANICAL PROPERTIES
OF FOAM CONCRETE MIXTURES

*Alla Yu. Bogatina*³, *Vladimir N. Morgun*², *Lyubov V. Morgun*¹

¹⁻³ Don State Technical University,

¹⁻³ 1 Gagarina pl., Rostov-on-Don 344000, Russia,

¹e-mail: konst-lvm@yandex.ru, ²e-mail: vnmorgun@sfnedu.ru, ³e-mail: ips@rgups.ru

Abstract Objectives At present, the urgency of scientific research aimed at reducing the material consumption of building structures is growing. Since foam concrete proved to be an effective material for wall structures, the aim of the present work was to develop scientific ideas about features of their macrostructural formation at the "viscous to solid" phase transition. **Methods** The evaluation of plastic strength was carried out according to the patent for invention No. 2316750 ("Method for determining the plastic strength of foam concrete mix" registered in the State Register of Inventions of the Russian Federation on February 10, 2008). Synthetic PO-3NP (TU 38-00-058079999-20-93) and "Arecom-4" galipot glue analogue (TU 31-10) were used as foam generation agents. Control over the kinetics of the plastic strength of the test mixtures of equal density was carried out in five-litre vessels at an interval of 15 minutes for three hours. **Results** The paper considers the most important features of mass transfer, which control the formation of defectiveness for interporal partitions in foam concrete. From the analysis of theoretical and experimental data, it follows that the ratio between water and surfactant consumption is an important tool for managing the quality of foam concrete mixes. Defining the optimal relationship between water consumption and the amount of foaming agent allows the maximum amount of surfactants to be located at the gas-liquid interface ensuring minimal defect in the structure of the interporal partitions in the cured concrete. **Conclusion** The theoretical and experimental studies carried out make it possible to consider the relationship between the consumption of water and surfactant as an important tool for controlling the structural and mechanical properties in foam concrete mixes.

Keywords: foam concrete mixture, plastic strength, coalescence

Введение. На государственном уровне одной из важнейших в Российской Федерации является задача обеспечения жильем как можно большего количества граждан. Для чего разрабатываются и создаются условия для развития рынка доступного жилья. Эта задача еще в 2002 году была сформулирована в национальном проекте (ФЦП «Жилище» 2002 – 2010) [1]. В настоящее время действует ФЦП «Жилище» 2015 – 2020 г., объем которой не превышает 1,5 млрд. рублей [2]. Поэтому чрезвычайно важно, чтобы строительный комплекс РФ располагал такой номенклатурой материалов, которая позволила бы эти средства израсходовать с максимальной эффективностью.

Строительство относится к отраслям максимальной материалоемкости. Поэтому для возведения жилья, соответствующего современным стандартам качества необходимы ресурсо- и энергосберегающие материалы. К числу таких материалов относятся газонаполненные (пено- и газо-) бетоны [3-6].

Анализ номенклатуры и свойств строительных изделий из газонаполненных бетонов, выпускаемых современной стройиндустрией РФ показывает, что в настоящее время, в силу объективных обстоятельств [7-8], строительный комплекс РФ применяет преимущественно мелкоштучные изделия из автоклавного газобетона [9-11]. Практика производства и применения крупноразмерных изделий из таких экологически дружелюбных организму человека материалов, практически утрачена.

Важнейшей причиной отказа от применения автоклавного газосиликата в качестве мате-

риала для изготовления крупноразмерных строительных конструкций является их недостаточная (отношение прочности на сжатие к прочности на растяжение меньше 10%) трещиностойкость [12-13]. А проблема изготовления высококачественных пенобетонов связана не только с низкой трещиностойкостью затвердевших бетонов, но и со сложностью обеспечения их агрегативной и седиментационной устойчивостью в период фазового и перехода «из вязкого в твердое» [14-15]. Дисперсное армирование пенобетонов синтетическими волокнами позволяет существенно повысить (отношение достигает 20...50%) трещиностойкость такого газонаполненного бетона [16-17]. Такое изменение эксплуатационных свойств затвердевших бетонов гарантированно достигается только тогда, когда при формировании их твердой фазы фибропенобетонные вязко пластичные смеси обладают достаточными структурно-механическими свойствами для противостояния седиментационной и агрегативной неустойчивости.

Постановка задачи. Целью настоящей работы является теоретическое обоснование и экспериментальное подтверждение возможности обеспечения седиментационной и агрегативной устойчивости фибропенобетонных смесей путем установления зависимости их структурно-механических свойств от рецептурных соотношений между жидкими компонентами сырья. В работе рассматривается только тот период становления структуры пенобетонной смеси, который расположен между её укладкой в форму и концом схватывания цементного вяжущего.

Пенобетонные смеси относятся к концентрированным суспензиям потому, что зерновой состав их твердой фазы включает спектр дисперсных частиц размером от мкм (химически взаимодействующие частицы клинкерных минералов) и обладающих мощным избытком поверхностной энергии, до частиц заполнителя, размеры которого примерно в 100 раз больше, а поверхностная энергия существенно меньше. Такие суспензии способны к формированию фрактальных кластеров в весьма короткие промежутки времени.

Механические свойства вязко пластичных дисперсных систем (пенобетонных смесей) предопределяются соотношением между гравитационными силами, действующими на дисперсные частицы твердой и газообразной фаз, и суммой сил, состоящих из сил капиллярного стяжения жидкой фазы и вандерваальсовых сил сцепления. Важно понимать, что соотношение между ними постоянно изменяется в связи с протеканием таких массообменных процессов как:

- образование кластеров из дисперсных частиц твердой фазы в структуре межпоровых перегородок. В результате, слабо физически связанная влага с поверхности частиц твердой фазы, расположенных в центре кластера, перемещается на его периферию [18] и, таким образом, способствует понижению концентрации поверхностно активных веществ (ПАВ) в объеме жидкой фазы;

- возникновение и рост гидратных новообразований цементного камня, в результате которых часть воды затвердения химически связывается и, таким образом, возникают рецептурные условия для повышения концентрации ПАВ в объеме жидкой фазы.

Методы исследования. Известно [19], что ПАВ при формировании пенных пленок полностью не перемещаются на границы раздела «газ-жидкость». Они весьма чувствительны к величине равновесного соотношения между их количествами на границах раздела «газ-жидкость» и в межчастичной жидкости. Поэтому так важно согласовывать с помощью рецептурных соотношений интенсивность протекания перечисленных выше массообменных процессов.

Нами установлено [20], что возможность сохранения дисперсной газовой фазы в структуре пенобетонных смесей (структурная устойчивость) предопределяется такой концентрацией ПАВ, которая, с одной стороны, не достигает величины критической концентрации мицеллообразования (ККМ) в период между укладкой смесей в формы и концом схватывания вяжущего. А с другой стороны, содержит такое количество жидкой фазы, которое прочно удерживается дисперсными частицами (твердыми и газовыми) смеси и не подчиняется силам гравитации.

Сохранение газовой фазы внутри жидких пленок ПАВ возможно до тех пор, пока пленки обладают свойством упругости. Под упругостью пленок понимают их способность увеличивать натяжение при растяжении. Это свойство характеризуется модулем упругости пленки (E), определяемым тождеством [21]:

$$E = A \frac{d\gamma}{dA} \quad (1)$$

где A – площадь пленки; γ – натяжение пленки.

До настоящего времени в технологии пенобетонов нет общепринятой методики, позволяющей количественно оценивать параметры структурной устойчивости смесей. Выполненные нами экспериментальные исследования и их анализ дают основание утверждать, что определение величины вязких сил между компонентами смеси по кинетике их пластической прочности позволит однозначно судить о её мере.

Оценка пластической прочности осуществлялась по патенту на изобретение № 2316750 («Способ определения пластической прочности пенобетонной смеси»), зарегистрированном в государственном реестре изобретений РФ 10.02.2008). В качестве пенообразователей применяли синтетический ПО-3НП по ТУ 38-00-058079999-20-93 и аналог клееканифоля «Ареком-4» по ТУ 31-10. Контроль кинетики пластической прочности исследуемых равноплотных смесей осуществляли в пятилитровых сосудах с интервалом 15 минут в течение трех часов.

Обсуждение результатов. Анализ данных таблицы 1 показывает, что, в общем, кинетика пластической прочности пенобетонных смесей во времени носит экспоненциальный характер. Полагаем, что скачкообразный характер набора пластической прочности связан с перераспределением и периодическим изменением объема межчастичной воды при отвердевании пенобетонной смеси.

Таблица 1. Влияние пенообразователей на кинетику пластической прочности пеносмесей
Table 1. The effect of foaming agents on the kinetics of plastic strength of foam mixtures

Время контроля, мин.	Пластическая прочность (Па) при расходе ПО, % от массы воды затворения								
	ПО 3-НП					Ареком-4			
	0,8	1,2	1,5*	3,0**	4,0***	0,2	0,25	0,3*	0,4**
0	49,6	58,7	56,3	55,5	53,4	36,2	45,6	45,6	49,6
15	52,1	67,8	65,2	58,7	53,4	47,8	70,0	48,9	48,9
30	65,2	72,1	60,9	65,2	56,9	47,8	75,4	60,9	58,5
45	60,9	67,8	72,1	67,8	49,6	50,2	97,4	72,1	75,4
60	67,8	99,1	82,7	75,5	-	55,5	88,2	65,2	64,3
75	75,5	86,7	86,7	72,1	-	52,1	119	86,7	86,7
90	72,1	119	79	72,1	-	65,2	142	76,5	58,5
105	93,6	128	84	79,7	-	75,4	133	92,6	78,9
120	97,8	128	112	85,5	-	76,5	128	106	103
135	119	127	106	93,6	-	80,2	139	106	133
150	110	161	108	101	-	86,7	133	127	99,1
165	127	180,3	154	97,8	-	96,5	156	139	138
180	138	189	148	106	-	128	189	154	133

Примечания:

^ˆ в ходе наблюдений имело место водоотделение, осадка смеси составляла по высоте до 1%;

*после укладки в ёмкости на поверхности пенобетонных смесей наблюдались редкие пенные пузыри ПАВ, диаметром 3...7 мм, осадки смеси не происходило;

** на поверхности смесей имела место коалесценция в виде всплывающих газовых включений диаметром 3...12 мм; после 3-х часов твердения, осадка заформованного материала по высоте составила 1,2...2,0%;

*** - показатели пластической прочности отсутствуют, так как из-за утраты структурной устойчивости, произошла такая осадка смеси, которая несовместима с целесообразностью дальнейшего твердения.

Прочность связи воды с поверхностью частиц твердой фазы выше, чем с плёнками ПАВ на границе раздела фаз «газ-жидкость» [22].

Поэтому уменьшение объема свободной воды, обусловленное её переходом в физически

связанное состояние при диспергации клинкерных минералов, влечет за собой повышение концентрации ПАВ и, как следствие, понижение упругости пенных пленок.

Понижение упругости пленок ПАВ ведёт к уменьшению пластической прочности смеси. Образование кластеров и их рост [22-23], по мере развития упругих кристаллизационных контактов в дисперсной системе, ведёт к общему, однако неравномерному, повышению прочности отвердевающей вязко-пластичной дисперсной системы.

Установлено, что кинетика пластической прочности не линейно зависит от содержания пенообразователей. При некотором, назовём его оптимальным, количестве пенообразователя пенобетонные смеси характеризуются максимальной скоростью роста пластической прочности. В том случае, когда содержание пенообразователя в смеси меньше или больше оптимального количества, скорость набора пластической прочности уменьшается. При этом, небольшой недостаток пенообразователя, по сравнению с оптимальным количеством, не оказывает существенного негативного влияния на структуру пеносмесей, в то время как превышение оптимума, кроме снижения скорости набора пластической прочности и осадки смеси, может привести и к расслоению (табл.).

Опираясь на работы, посвященные закономерностям адсорбции ПАВ [21, 24] и структурообразования бетонов [22] полагаю, что наличие оптимума объясняется влиянием на структурно-механические свойства смесей следующих факторов:

- 1) толщиной пленок жидкой фазы, управляющих плотностью кластеров и прочностью межагрегатных связей между ними;
- 2) энергетическим соответствием между ПАВ в структуре пенных пленок и объёме межчастичной жидкости.

При расходе пенообразователя меньше оптимального, вода не связанная физически молекулами ПАВ в пленках, увеличивает расстояния между частицами твердой фазы в пенобетонных смесях, способствует образованию кластеров пониженной плотности и, таким образом, понижает скорость набора прочности.

Если расход пенообразователя выше оптимального, то в жидкой фазе пенобетонной смеси появляется избыточное количество ПАВ, которому не хватило воды для перехода на поверхность раздела фаз «газ-жидкость».

Избыток ПАВ обуславливает не только дополнительную раздвижку частиц твердой фазы, но и дополнительное понижение вязкости дисперсионной среды, создает энергетические условия для проявления коалесценции при достижении в межчастичной жидкости ККМ. Поэтому кроме замедления набора прочности такие пенобетонные смеси могут характеризоваться осадкой или даже разрушением структуры.

Вывод. Обобщая изложенное можно заключить, что выполненные теоретические и экспериментальные исследования позволяют считать соотношение между расходом воды и ПАВ важным инструментом управления величиной структурно-механических свойств в пенобетонных смесях. Установление оптимального рецептурного соотношения между расходом воды и количеством пенообразователя позволяет максимальному количеству ПАВ находиться на границе раздела фаз «газ-жидкость» и, таким образом, физически прочно связывать то количество воды затворения, которое химически не связано с клинкерными минералами.

Недостаток пенообразователя в рецептуре смесей обеспечивает избыточную раздвижку частиц твердой фазы водой затворения, физически не связанной пленками ПАВ. Поэтому структурно-механические свойства пенобетонных смесей ухудшаются, что ведет к снижению скорости набора механической прочности, водоотделению и осадке.

Избыток пенообразователя, не смотря на высокое начальное воздухововлечение, способствует образованию мицелл ПАВ в жидкой фазе и проявлению коалесценции.

Избыток ПАВ, так же как и недостаток снижает скорость фазового перехода пенобетонной смеси «из вязкого в твердое», а, значит, способствует частичной или даже полной утрате дисперсной газовой фазы в процессе отвердевания пенобетонной смеси. Потеря вовлеченного газа при отвердевании пенобетонной смеси предопределяет высокую меру дефектности затвердевшего пенобетона.

Библиографический список:

1. Официальный сайт Федеральной целевой программы «Жилище» на 2002-2010 гг. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.fcpsdom.ru>.
2. Официальный сайт перечня Федеральных целевых программ на 2016 г. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.fcp.economy.gov.ru>.
3. Карпенко Н.И., Ярмаковский В.Н. Основные направления ресурсоэнергосбережения при строительстве и эксплуатации зданий. Часть 1. Ресурсоэнергосбережение на стадии производства строительных материалов, стеновых изделий и ограждающих конструкций// Строительные материалы, 2013, № 7. – С. 12-18.
4. Карпенко Н.И., Ярмаковский В.Н. Основные направления ресурсоэнергосбережения при строительстве и эксплуатации зданий. Часть 1 (продолжение). Ресурсоэнергосбережение на стадии производства строительных материалов, стеновых изделий и ограждающих конструкций// Строительные материалы, 2013, № 8. – С. 65-72.
5. Вишневский А.А., Гринфельд Г.И., Смирнова А.С. Производство газобетона в России//Строительные материалы, 2015, №6. – С.52-54.
6. Король О.А. Исследования и наукоемкие разработки в области энергоэффективного строительного производства//Строительные материалы, 2015, №6. – С.13 – 15.
7. СНиП 23-02-2003 «Тепловая защита зданий».
8. Федеральный закон № 261-ФЗ от 23 ноября 2009 г. «Об энергосбережении ...»
9. Бердов Г.И., Елесин М.А., Умнова Е.В. Ячеистый шлакопортландцементный бетон на известково-серном затворителе//Строительные материалы, 2015, №5. – С.74, 75.
10. Карпушенков С.А., Савенко В.П. Компенсация усадки пенобетона//Строительные материалы, 2015, №3. – С.3 – 5.
11. Моргун В.Н., Моргун Л.В., Черенкова И.А. К вопросу об эффективности теплоизоляции фасадов гражданских зданий//Жилищное строительство, 2015, №4. С. 21-24.
12. Сажнев Н.П., Сажнев Н.Н. Производство, свойства и применение ячеистого бетона автоклавного твердения//Строительные материалы, 2004, №3. – С.2-6.
13. Меркин А.П., Таубе П.Р. Непрочное чудо. М: Химия, 1983. – 224 с.
14. Шахова Л.Д. Некоторые аспекты исследований структурообразования ячеистых бетонов неавтоклавного твердения//Строительные материалы: Наука. 2003, №2. – С.4-7.
15. Моргун Л.В., Моргун В.Н., Смирнова П.В., Костыленко К.И., Пушенко О.В. Воздухововлечение в пеносмеси, как функция растворимости ПАВ в воде//Научный вестник ВГАСУ. Воронеж, ВГАСУ, 2012, №5. – С. 82-89.
16. Моргун В.Н. О способах повышения эксплуатационной надежности пенобетонов// Научный Вестник Воронеж ГАСУ. Серия«Физико-химические проблемы и высокие технологии строительного материаловедения», Воронеж ГАСУ, 2015, №2(11). – С. 62...64.
17. Моргун Л.В. Приемы управления эксплуатационной надежностью пенобетонов// Технологии бетонов, 2014, №9 (98).- С.37...39.
18. Бобрышев А.Н., Козомазов В.Н., Бабин Л.О., Соломатов В.И. Синергетика композиционных материалов. – Липецк, НПО "ОРИУС", 1994. – 153 с.
19. Веденов А.А. Физика растворов. М.: Наука, 1984. – 112 с.
20. Моргун Л.В. Структурообразование и свойства фибропенобетонов неавтоклавного твердения: Теория и методология рецептурно-технологического регулирования/Дисс. на соиск.уч.ст. докт. техн. наук, Ростов-на-Дону, РГСУ, 2005. -336 с.
21. Русанов А.И. Фазовые равновесия и поверхностные явления. М., "Химия", 1967.- 388 с.
22. Перцев В.Т. Управление процессами раннего структурообразования бетонов. Дисс. ...д.т.н.- Воронеж, 2001.- 433 с.
23. Перцев В.Т., Шмитько Е.И., Головинский П.А. Роль дисперсности и влажности в процессах структурообразования дисперсно зернистых систем //Изв.ВУЗов. Строительство.1998, №6.- С.45...50.
24. Тихомиров В.К. Пены.-М.: Химия. 1975.- 264 с.

References:

1. Ofitsial'nyi sait Federal'noi tselevoi programmy “Zhilishche” na 2002-2010 gg. [Elektronnyi resurs]. URL: <http://www.fcpsdom.ru>. [The official website of the “Housing” Federal Target Program for 2002-

2010. [Electronic resource]. URL: <http://www.fcpdom.ru>. (in Russ.)
2. Ofitsial'nyi sait perechnya Federal'nykh tselevykh programm na 2016 g. [Elektronnyi resurs]. URL: <http://www.fcp.economy.gov.ru>. [The official website of the list of Federal Target Programs for 2016 [Electronic resource]. URL: <http://www.fcp.economy.gov.ru>. (in Russ.)]
 3. Karpenko N.I., Yarmakovskii V.N. Osnovnye napravleniya resursoenergoberezheniya pri stroitel'stve i ekspluatatsii zdanii. Chast' 1. Resursoenergoberezhenie na stadii proizvodstva stroitel'nykh materialov, stenovykh izdelii i ograzhdayushchikh konstruksii. Stroitel'nye materialy. 2013;7:12-18.[Karpenko N.I., Yarmakovskii V.N. The main areas of resource and energy conservation in the construction and operation of buildings. Part 1. Resource and energy saving at the stage of production of building materials, walling products and enclosing structures. Construction materials. 2013;7:12-18. (in Russ.)]
 4. Karpenko N.I., Yarmakovskii V.N. Osnovnye napravleniya resursoenergoberezheniya pri stroitel'stve i ekspluatatsii zdanii. Chast' 1 (prodolzhenie). Resursoenergoberezhenie na stadii proizvodstva stroitel'nykh materialov, stenovykh izdelii i ograzhdayushchikh konstruksii. Stroitel'nye materialy. 2013;8:65-72.[Karpenko N.I., Yarmakovskii V.N. The main areas of resource and energy conservation in the construction and operation of buildings. Part 1 (continued). Resource and energy saving at the stage of production of building materials, walling products and enclosing structures. Construction materials. 2013;8:65-72.(in Russ.)]
 5. Vishnevskii A.A., Grinfel'd G.I., Smirnova A.S. Proizvodstvo gazobetona v Rossii. Stroitel'nye materialy. 2015;6:52-54.[Vishnevskii A.A., Grinfel'd G.I., Smirnova A.S. Production of aerated concrete in Russia. Construction materials. 2015;6:52-54. (in Russ.)]
 6. Korol' O.A. Issledovaniya i naukoemkie razrabotki v oblasti energoeffektivnogo stroitel'nogo proizvodstva. Stroitel'nye materialy. 2015;6:13 – 15.[Korol' O.A. Research and knowledge-intensive developments in the field of energy-efficient construction production. Construction materials. 2015;6:13 – 15. (in Russ.)]
 7. SNiP 23-02-2003 “Teplovaya zashchita zdanii”. [SNiP 23-02-2003 “Thermal protection of buildings”. (in Russ.)]
 8. Federal'nyi zakon № 261-FZ ot 23 noyabrya 2009 g. “Ob energosberezhenii ...” [Federal Law No. 261-FZ from November 23, 2009 “On Energy Saving ...”(in Russ.)]
 9. Berdov G.I., Elesin M.A., Umnova E.V. Yacheisty i shlakoportlandtsementnyi beton na izvestkovom zatvoritele. Stroitel'nye materialy. 2015;5:74-75.[Berdov G.I., Elesin M.A., Umnova E.V. Cellular slag portland cement concrete with a lime-sulfur sealing compound. Construction materials. 2015;5:74-75. (in Russ.)]
 10. Karpushenkov S.A., Savenko V.P. Kompensatsiya usadki penobetona. Stroitel'nye materialy. 2015;3:3–5.[Karpushenkov S.A., Savenko V.P. Compensation of foam concrete shrinkage. Construction materials. 2015;3:3–5.(in Russ.)]
 11. Morgun V.N., Morgun L.V., Cherenkova I.A. K voprosu ob effektivnosti teploizolyatsii fasadov grazhdanskikh zdanii. Zhilishchnoe stroitel'stvo. 2015;4:21-24.[Morgun V.N., Morgun L.V., Cherenkova I.A. To the question of the effectiveness of thermal insulation of the civil building facades. Zhilishchnoe Stroitel'stvo. 2015;4:21-24. (in Russ.)]
 12. Sazhnev N.P., Sazhnev N.N. Proizvodstvo, svoystva i primeneniye yacheistogo betona avtoklavnogo tverdeniya. Stroitel'nye materialy. 2004;3:2-6.[Sazhnev N.P., Sazhnev N.N. Production, properties and application of cellular concrete after autoclaved hardening. Construction materials. 2004;3:2-6. (in Russ.)]
 13. Merkin A.P., Taube P.R. Neprochnoe chudo. M: Khimiya; 1983. 224 s.[Merkin A.P., Taube P.R. Fragile miracle. M: Khimiya; 1983. 224 p. (in Russ.)]
 14. Shakhova L.D. Nekotorye aspekty issledovaniya strukturoobrazovaniya yacheistykh betonov neavtoklavnogo tverdeniya. Stroitel'nye materialy: Nauka. 2003;2:4-7.[Shakhova L.D. Some aspects of studies of the structure formation of cellular concrete after non-autoclaved hardening. Stroitel'nye materialy: Nauka. 2003;2:4-7. (in Russ.)]
 15. Morgun L.V., Morgun V.N., Smirnova P.V., Kostylenko K.I., Pushenko O.V. Vozdukhovovlechenie v penosmesi kak funktsiya rastvorimosti PAV v vode. Nauchnyi vestnik VGASU. 2012;5:82-89.[Morgun L.V., Morgun V.N., Smirnova P.V., Kostylenko K.I., Pushenko O.V. Air entrainment in a foam mixture as a function of the solubility of surfactants in water. Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering.2012;5:82-89. (in Russ.)]
 16. Morgun V.N. O sposobakh povysheniya ekspluatatsionnoi nadezhnosti penobetonov. Nauchnyi Vestnik VGASU. Seriya “Fiziko-khimicheskie problemy i vysokie tekhnologii stroitel'nogo materialovedeni-

- ya". 2015;2(11):62-64.[Morgun V.N. On the ways to increase the operational reliability of foam concrete. Scientific bulletin of the Voronezh state architectural and construction university. Series: Physical and chemical problems and high technologies of construction materials science. 2015;2(11):62-64. (in Russ.)]
17. Morgun L.V. Priemy upravleniya ekspluatatsionnoi nadezhnost'yu penobetonov. Tekhnologii betonov. 2014;9(98):37-39.[Morgun L.V. Techniques of managing the operational reliability of foam concrete. Concrete Technologies. 2014;9(98):37-39. (in Russ.)]
 18. Bobryshev A.N., Kozomazov V.N., Babin L.O., Solomatov V.I. Sinergetika kompozitsionnykh materialov. Lipetsk: NPO "ORIOUS"; 1994. 153 s.[Bobryshev A.N., Kozomazov V.N., Babin L.O., Solomatov V.I. Synergetics of composite materials. Lipetsk: NPO "ORIOUS"; 1994. 153 p. (in Russ.)]
 19. Vedenov A.A. Fizika rastvorov. M.: Nauka; 1984. 112 s.[Vedenov A.A. The physics of solutions. M.: Nauka; 1984. 112 p. (in Russ.)]
 20. Morgun L.V. Strukturnoobrazovanie i svoystva fibropenobetonov neavtoklavnogog tverdeniya: Teoriya i metodologiya retsepturno-tekhnologicheskogo regulirovaniya. Diss. na soisk.uch.st. dokt. tekhn. nauk. Rostov-na-Donu: RGSU; 2005. 336 s. [Morgun L.V. Structurization and properties of non-autoclaved curing fibroblack concrete: Theory and methodology of prescription and technological regulation. Doctor of technical sciences thesis. Rostov-na-Donu: RGSU; 2005. 336 p. (in Russ.)]
 21. Rusanov A.I. Fazovye ravnovesiya i poverkhnostnye yavleniya. M.: Khimiya; 1967. 388 s.[Rusanov A.I. Phase equilibria and surface phenomena. M.: Khimiya; 1967. 388 p. (in Russ.)]
 22. Pertsev V.T. Upravlenie protsessami rannego strukturnoobrazovaniya betonov. Diss. ...d.t.n. Voronezh; 2001. 433 s.[Pertsev V.T. Management of the processes of early structure formation of concrete. Doctor of technical sciences thesis. Voronezh; 2001. 433 p. (in Russ.)]
 23. Pertsev V.T., Shmit'ko E.I., Golovinskii P.A. Rol' dispersnosti i vlazhnosti v protsessakh strukturnoobrazovaniya dispersno zernistykh sistem. Izv.VUZov. Stroitel'stvo.1998;6:45-50.[Pertsev V.T., Shmit'ko E.I., Golovinskii P.A. The role of dispersity and humidity in the processes of structuring of dispersed granular systems. News of higher educational institutions. Construction. 1998;6:45-50. (in Russ.)]
 24. Tikhomirov V.K. Peny. M.: Khimiya; 1975. 264 s.[Tikhomirov V.K. Foams. M.: Khimiya; 1975. 264 p. (in Russ.)]

Сведения об авторах:

Богатина Алла Юрьевна - кандидат технических наук, доцент, кафедра изыскания, проектирование и строительство железных дорог.

Моргун Владимир Николаевич - кандидат технических наук, доцент, кафедра инженерно-строительных дисциплин.

Моргун Любовь Васильевна - доктор технических наук, профессор, кафедра строительных материалов.

Information about the authors.

Alla Yu. Bogatina – Cand. Sci. (Technical), Assoc. Prof., Department of Survey, Design and Construction of Railways.

Vladimir N. Morgun – Cand. Sci. (Technical), Assoc. Prof., Department of Engineering and Construction Disciplines.

Lyubov V. Morgun – Dr. Sci. (Technical), Prof., Department Building Materials.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 15.03.2018.

Принята в печать 10.05.2018.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 15.03.2018.

Accepted for publication 10.05.2018.

Для цитирования: Булгаков А.И., Вишталов Р.И., Муселемов Х.М., Устарханов О.М. Расчет трехслойных труб большого диаметра на ПК «Лира» Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2018;45 (2):191-199 DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-2-191-199

For citation: Bulgakov A. I., Vishtalov R.I., Muselemov H.M., Ustarkhanov O.M. Calculation of three-layer large diameter pipes on the PC «LIRA». Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2018; 45 (2): 191-199. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-2-191-199

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

УДК 624.011.1

DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-2-191-199

РАСЧЕТ ТРЕХСЛОЙНЫХ ТРУБ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА НА ПК «ЛИРА»

Булгаков А.И.², Вишталов Р.И.⁴ Муселемов Х.М.³ Устарханов О.М.¹

¹⁻⁴Дагестанский государственный технический университет,

¹⁻⁴367026, г. Махачкала, пр. Имама Шамиля, 70, Россия,

¹e-mail: dgtu.pgs@mail.ru, ²e-mail: dgtu.pgs@mail.ru,

³e-mail: hairulla213@mail.ru, ⁴e-mail: dgtu.pgs@mail.ru

Резюме. Цель. В данной статье рассматривается оценка возможности применения трехслойных трубопроводов. Для этого исследуется напряженно-деформированное состояние трехслойных труб при действии внутреннего давления. Самыми крупными в современном мире считаются магистральные трубопроводы. В основном их используют для транспортировки нефти и газа с мест добычи до перерабатывающих предприятий. Трубопроводы предназначены для перемещения жидкости, газов и других сред и, прежде всего, это водопроводы. Как известно, магистральные и технологические трубопроводы являются исключительно металлоемкими сооружениями, на строительство которых расходуются миллионы тонн стали. С другой стороны, одним из главных показателей экономичности магистральных трубопроводов является их расход материала. Магистральные трубопроводы, как правило, имеют большую протяженность, и поэтому необоснованное увеличение расчетной толщины стенок труб хотя бы на 1 мм приводит к перерасходу стали на десятки и даже сотни тысяч тонн. В связи с этим к расчетам магистральных трубопроводов на прочность должно уделяться самое серьезное внимание. **Метод.** Расчет проводится численными методами, а именно с помощью метода конечных элементов (МКЭ), реализованного в ПК «ЛИРА». **Результат.** Расчет труб выполнен на нагрузку от транспортируемой среды, приложенный к внутреннему контуру трубы. При этом для трехслойной трубы (первый вариант) и для труб второго и третьего вариантов, определялись кольцевые растягивающие напряжения и деформации. Приведены изополя растягивающих и касательных напряжений, построена сравнительная графическая зависимость кольцевых растягивающих напряжений. **Вывод.** Полученные численные результаты, показали, что выбранная расчетная схема (вар.1), то есть представление сплошностенчатого сечения трубы в виде трехслойной, является правильной. Расхождения между полученными данными связаны с поворотом сечения по радиусу трубы. В целом результаты расчетов показали возможность применения трехслойной стенки труб для транспортировки различных сред.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантом Президента Российской Федерации (МК-6112.2018.8).

Ключевые слова: метод конечных элементов, трехслойные конструкции, заполнитель, несущие слои, трубы различного диаметра

TECHNICAL SCIENCE
BUILDING AND ARCHITECTURE

CALCULATION OF THREE-LAYER LARGE DIAMETER PIPES
ON THE PC «LIRA»

Aleksandr I. Bulgakov², Rajab I. Vishtalov³, Hayrulla M. Muselemov⁴, Osman M. Ustarkhanov¹
*¹⁻⁴Дагестанский государственный технический университет,
¹⁻⁴367026, г. Махачкала, пр. Имама Шамиля, 70, Россия,
¹e-mail: dgtu.pgs@mail.ru, ²e-mail: dgtu.pgs@mail.ru,
³e-mail: hairulla213@mail.ru, ⁴e-mail: dgtu.pgs@mail.ru*

Abstract Objectives This article discusses the evaluation of the possibility of application of three-layer pipelines. For this purpose, the stress-strain state of three-layer pipes under the action of internal pressure is investigated. The largest in the modern world are considered to be the main pipe-water. They are mainly used to transport oil and gas from production sites to processing plants. Pipelines are intended for movement of liquid, gases and other environments and first of all it is water pipelines. As you know, main and technological pipelines are IP-elite club that cares only metal buildings, the construction of which consume Xia millions of tons of steel. On the other hand, one of the main indicators of efficiency of trunk pipelines is their material consumption. As a rule, trunk pipelines have a long length, and therefore an unreasonable increase in the even thickness of the pipe walls by at least 1 mm leads to an overspending of steel by de-siyatki and even hundreds of thousands of tons. In this regard, to the calculations of the main pipe wires for strength should be given the most serious attention. **Methods** The calculation is carried out by numerical methods, namely with the help of finite element meto-da (FEM), implemented in the PC "LIRA". **Results** The calculation of the pipes is performed on the load from the transported medium applied to the inner contour of the pipe. In this case, for the three-layer pipe (the first option) and for the pipes of the second and third options, the ring tensile stresses and strains were determined. The isofields of tensile and shear stresses are given, the comparative graphical dependence of ring tensile stresses is constructed. **Conclusion.** The obtained numerical results showed that the selected calculation scheme (var.1), that is, the representation of the continuous section of the pipe in the form of a three-layer, is correct. The discrepancies between the data obtained are related to the rotation of the section along the radius of the pipe. In General, the results of calculations showed the possibility of using a three-layer pipe wall for transportation of various media.

Acknowledgment. This work was supported by a grant from the President of the Russian Federation (МК-6112.2018.8).

Keywords: finite element method, three-layer structures, filler, bearing layers, pipes of different diameters

Введение. Основой любой современной трубопроводной системы являются трубы большого диаметра (ТБД), на которые возлагается важная задача по перемещению по ним различных веществ. Именно они применяются при строительстве всевозможных канализационных и водопроводных сетей, тепловых сооружений, водоканалов, магистральных газо- и нефтепроводов. Как известно, трубопроводы большого диаметра и протяженности являются материалоёмкими сооружениями, на изготовление которых тратятся миллионы тонн стали. Необоснованное увеличение толщины стенок труб приводит к большим перерасходам материала и, в связи с этим, расчету магистральных трубопроводов должно уделяться самое серьезное внимание [1,18].

Постановка задачи. В процессе эксплуатации магистральные трубопроводы подвергаются воздействию ряда силовых факторов, которые в той или иной степени влияют на условия работы конструкции. При расчете необходимо ясно представить себе значение этих факторов и их влияние на предельное состояние трубопроводов. К числу таких силовых воздействий отно-

сятся: внутреннее давление, продольные растягивающие и сжимающие усилия, изгиб трубопровода по рельефу местности, давление засыпки грунта и подвижных нагрузок и т.д. Внутреннее давление является одним из основных и решающих силовых воздействий, которое влияет на работу трубопроводов. Поэтому при расчете трубопроводов толщину стенок труб находят исходя из заданного внутреннего давления [2-4].

Исследования, проводимые в ДГТУ показали, что для повышения эксплуатационных качеств трубопроводной системы можно использовать трехслойную конструкцию, то есть изготовить трехслойную цилиндрическую оболочку (трубу), состоящую из двух несущих слоев и дискретного заполнителя [6,17,19], как показано на рис.1. Данная система позволит повысить прочностные характеристики и эксплуатационные качества трубопроводов, и кроме этого по ней можно будет транспортировать две среды (например, газ и воду).

Как известно, многослойные конструкции при малом весе обладают повышенной жесткостью на изгиб, что позволяет получить значительный выигрыш в весе. Кроме того, во многих случаях многослойные пакеты обладают высокими теплоизолирующими и другими свойствами, что является немаловажным фактором при эксплуатации ряда современных изделий различного назначения. Трехслойные трубопроводы представляют собой сложную пространственную конструкцию, образованную наружным и внутренним несущими слоями, а также дискретной конструкцией заполнителя. При этом слои могут различаться как по толщине, так и по физико-механическим свойствам, то есть пакет может быть существенно неоднороден [5,20].

Методы исследования. Как отмечалось выше, трехслойная конструкция представляет собой систему, которая состоит из двух внешних сравнительно тонких слоев (несущие слои) и среднего, более толстого слоя (заполнитель, рис.1) [6].

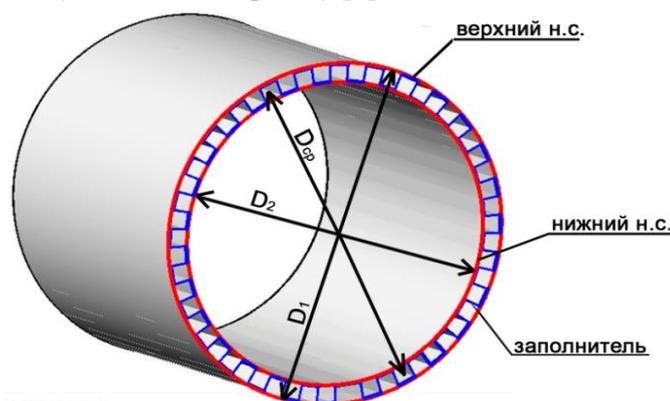


Рис. 1. Общий вид трехслойной трубы
Fig.1. General view of the three-layer pipe

Несущие слои воспринимают продольные нагрузки (растяжение, сжатие, сдвиг) в своей плоскости и поперечные изгибающие моменты. Заполнитель воспринимает поперечные силы при изгибе и обеспечивает совместную работу и устойчивость несущих слоев. Способность заполнителя воспринимать нагрузку в плоскости несущих слоев зависит от конструкции заполнителя и его жесткостных характеристик.

В данной статье описано исследование НДС трехслойной трубы с применением МКЭ, реализованного на ПК «ЛИРА» [7-12,15-16]. МКЭ является одним из широко применяемых в практике методов прочностного расчета конструкций. МКЭ представляет собой процедуру приближенного решения дифференциальных уравнений. На сегодняшний день МКЭ считается универсальным методом получения численных решений для широкого диапазона инженерных задач.

В данной статье авторы рассматривают задачу замены сплошностенчатого сечения трубы на трехслойное сечение, в котором заполнителем является гофра (рис. 2).

Для оценки напряженно-деформированного состояния рассматриваются три варианта трубы $R_1 = \frac{D_1}{2} = 500$ мм, $R_2 = \frac{D_2}{2} = 450$ мм, $R_{cp} = \frac{D_{cp}}{2} = 475$ мм:

- сечение в виде двутавра (трехслойная труба, рис. 3а) - вариант 1;
- сплошное сечение равной жесткости J_Y (рис. 3б) - вариант 2;
- сплошное сечение равной площадью (рис. 3в) - вариант 3.

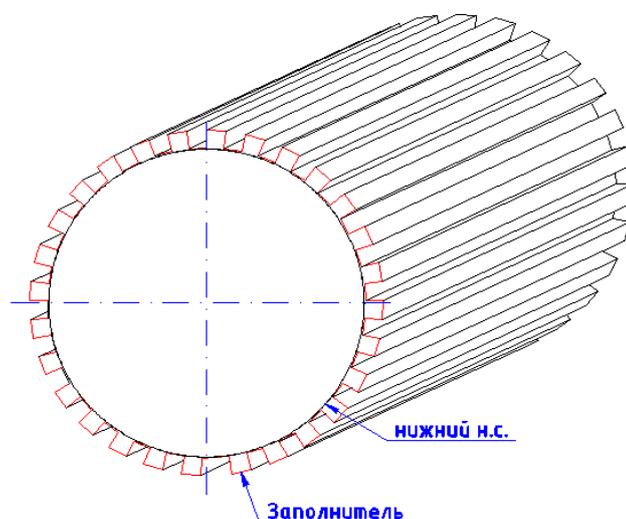


Рис. 2. Заполнитель для трехслойной трубы в виде гофра
Fig. 2. Filler for three-layer pipe in the form of corrugation

Материалом всех труб служит алюминий марки АМГ с расчетными характеристиками $\rho=2,78\text{т/м}^3$, $E=6,9\text{ т/м}^2$ [13-14]. В общем случае для изготовления трехслойной трубы можно использовать и другие материалы.

Расчет производим для среднего участка бесконечной трубы. Так как такое условие в расчетной модели реализовать невозможно, то соответственно принимаем модель трубы конечной длины, в нашем случае длиной 3 м, «подвешенной» по концам на связевых элементах длиной 1 м и имеющих погонную жесткость равную отброшенной части сечения.

При этом, напряженно-деформированное состояние трубы на участках, примыкающих к связям в расчет не берем.

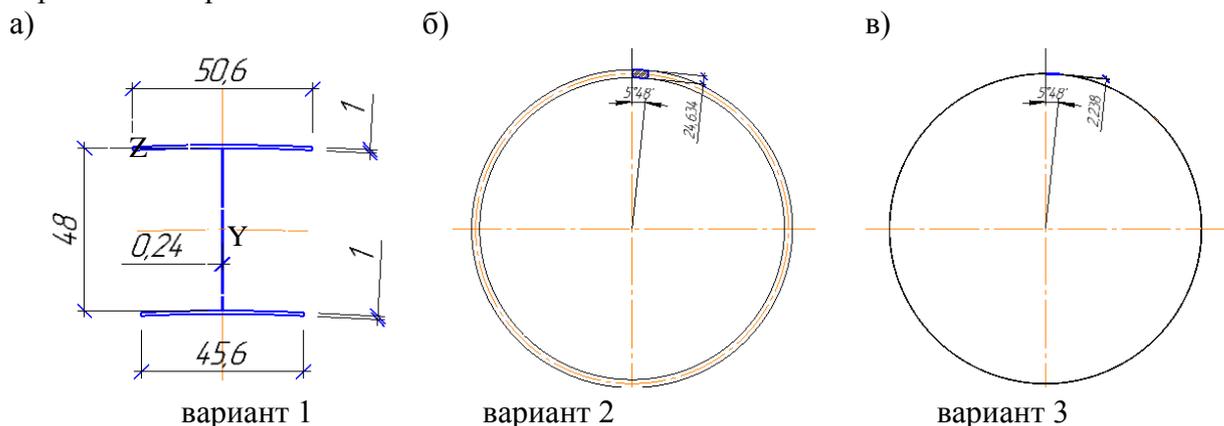


Рис. 3. Варианты сечения труб
Fig. 3. Options of the pipe sections

Расчет производился на равномерно распределенную нагрузку, приложенную к внутреннему несущему слою трубы.

Схема приложения нагрузки к трубе первого варианта показана на рис. 4.а.

Схема приложения нагрузки для второго и третьего вариантов труб аналогичная и показано на рис. 4.б.

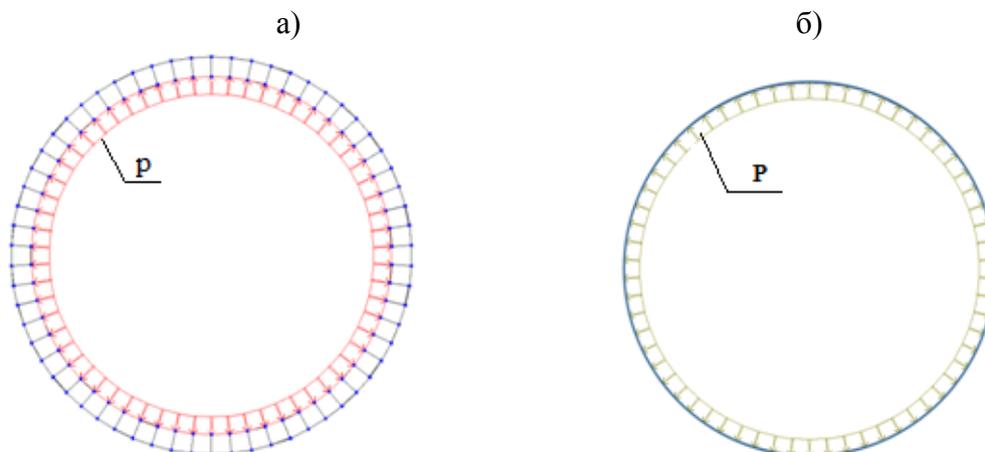


Рис. 4. Схема приложения нагрузки

Fig. 4. The scheme of load application

Обсуждение результатов. Как было отмечено выше, расчет труб выполнен на нагрузку от транспортируемой среды, приложенной к внутреннему контуру трубы.

При этом для трехслойной трубы, определялись кольцевые растягивающие напряжения и деформации. Для труб второго и третьего вариантов определялись аналогичные напряжения и деформации, что и для первого варианта. Результаты расчета трубы, показаны на рис. 5–8 и в таблице 1.

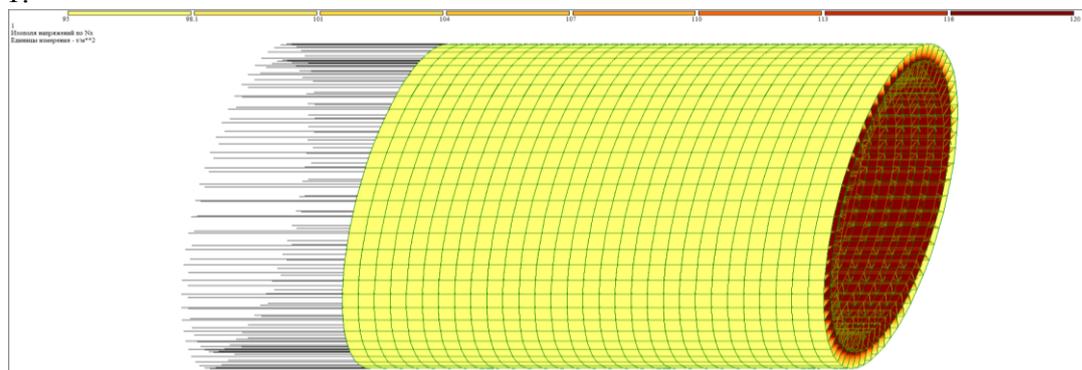


Рисунок 5. Кольцевые растягивающие напряжения N_x

Figure 5. Ring tensile stresses N_x

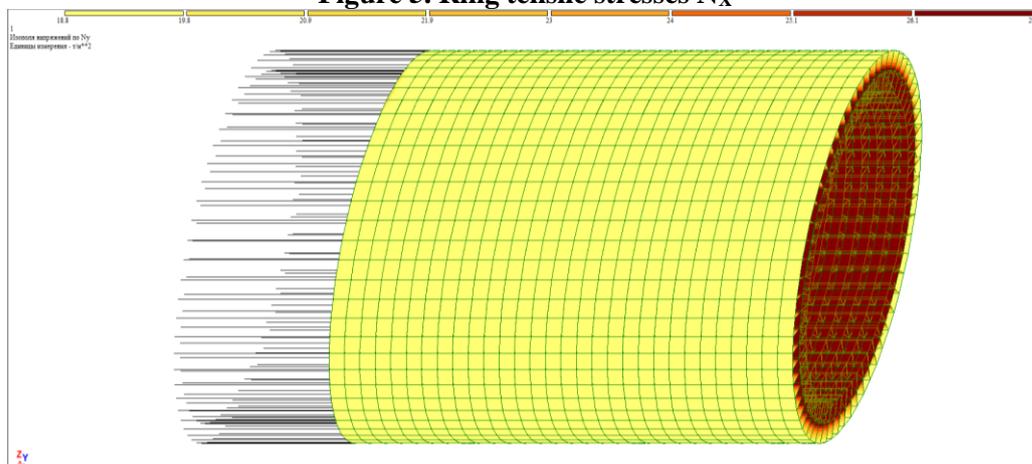


Рис. 6. Кольцевые растягивающие напряжения N_y

Fig. 6. Ring tensile stresses N_y

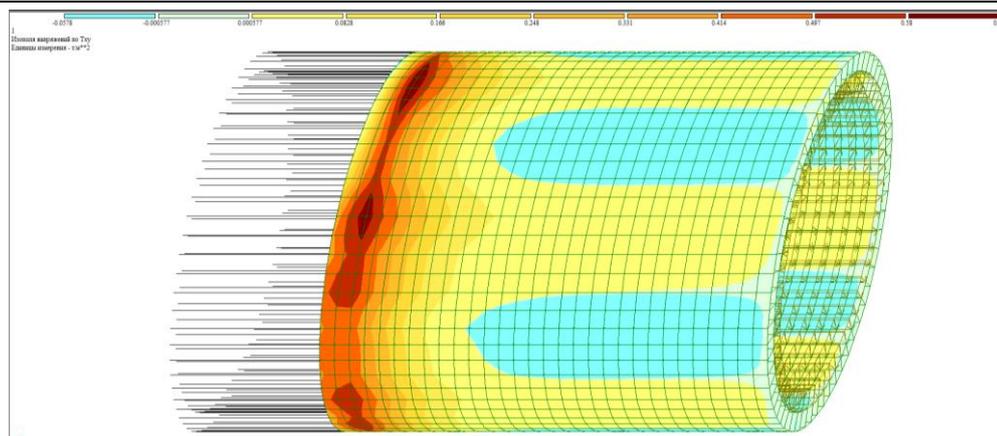


Рис.7. Касательные напряжения T_{xy}
 Fig. 7. Tangential stresses T_{xy}

Таблица 1. Результаты расчета трубы
 Table 1. The results of the calculation of the pipe

N п/п	Показатели	Результаты при $p=1\text{т/м}^2$			
		Трехслойная (вар.1)		Однослойная, $t=24,634\text{мм}$ (вар.2)	Однослойная, $t=2,238\text{мм}$ (вар.3)
		наружный несущий слой (н. н. с.)	внутренний несущий слой (в. н. с.)		
1	Y, мм	$\pm 0,00371$	$\pm 0,00371$	$\pm 0,00125$	$\pm 0,0404$
2	Z, мм	$\pm 0,0296$	$\pm 0,0296$	$\pm 0,00124$	$\pm 0,0113$
3	$N_x, \text{т/м}^2$	98,1	120	19,5	218
4	$N_y, \text{т/м}^2$	19,8	27,2	4,05	45,1
5	$T_{xy}, \text{т/м}^2$	$-0,0578 \div$ $+0,0828$	$-0,0578 \div$ $+0,0828$	$\pm 0,00114$	$\pm 2,6$

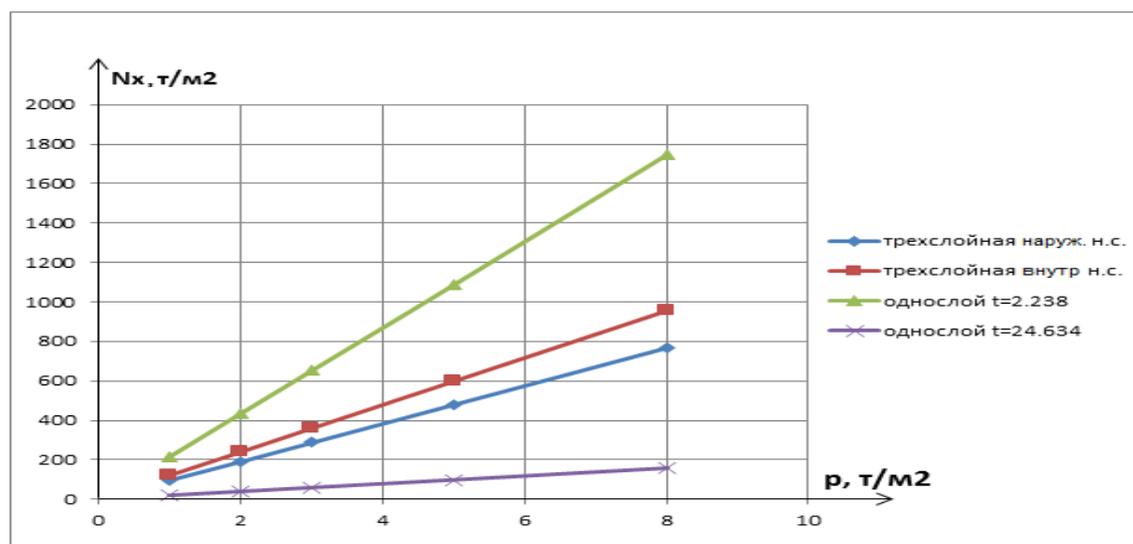


Рис. 8. График сравнение кольцевых растягивающих напряжений
 Fig.8. Chart comparison of the ring tensile stress

Для оценки работы выбранных вариантов под действующей нагрузкой были сравнены кольцевые растягивающие напряжения N_x .

Анализ напряжений N_x показал:

1. Напряжения в варианте 2:

- на 91% меньше, чем в варианте 3;
- на 80% меньше, чем в наружном несущем слое варианта 1 и на 84% , чем во внутреннем несущем слое того же варианта;

2. Напряжения в варианте 1:

- в наружном несущем слое на 55% меньше, чем в варианте 3;
- во внутреннем несущем слое на 45% меньше чем в варианте 3;

3. Расход материала во втором варианте на 91% больше, чем в вариантах 1 и 3;

4. Расход материала в первом и в третьем варианте одинаковый в силу равенства площадей сечения труб. Однако, напряжение в каждом несущем слое варианта 1, меньше чем в варианте 2.

Вывод. Полученные результаты показали, что выбранная расчетная схема (вар.1), то есть представление сплошностенчатого сечения трубы в виде трехслойной, является правильной. Расхождения между полученными данными связаны с поворотом сечения по радиусу трубы.

В целом результаты расчетов показали возможность применения трехслойной стенки труб для транспортировки различных сред.

Библиографический список:

1. А.Г.Камерштейн, В.В. Рождественский, М.Н. Ручимский – Расчет трубопроводов на прочность. Москва 1963.
2. Айнбиндер А.Б., Камерштейн А.Г. Расчет магистральных трубопроводов на прочность и устойчивость. Справочное пособие. М.: Недра, 1982. - 341 с.
3. Березина И.В., Самойлов Б.В. Особенности расчета профиля магистрального трубопровода большого диаметра. Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов, 1976, JS 10, с. 15-17.
4. Бородавкин П.П., Синюков А.М. Прочность магистральных трубопроводов. М.: Недра, 1984. - 245 с.
5. Александров А. Я. Куршин Л. М. Трехслойные пластинки и оболочки. – В– кн.: Прочность, устойчивость, колебания. М.: Машиностроение, 1968, т.2.
6. Кобелев В.Н., Коварский Л.М., Тимофеев С.И. Расчет трехслойных конструкций. М.: Машиностроение, 1984.
7. Агапов В.П. Метод конечных элементов в статике, динамике, и устойчивости пространственных тонкостенных подкреплённых конструкций. Учебное пособие М.: Изд АСВ, 2000, 152с.
8. Галлагер Р. Метод конечных элементов. М.: 1984г, 424с.
9. Городецкий А.С., Евзеров И.Д. Компьютерные модели конструкций. М.: Издательство Ассоциации строительных вузов. 2009г, 360стр.
10. Рикардс Р.Б. Метод конечных элементов в теории оболочек и пластин. Рига: Зинатне, 1988, 284с.
11. Стренг Г., Фикс Д. Теория метода конечных элементов. М.: 1977, 350с.
12. Устарханов О.М., Булгаков А.И., Муселемов Х.М., Устарханов Т.О. Журнал «Известия высших учебных заведений» «Технические науки». 2012, №5. Расчет трехслойных балок с учетом клевого шва по методу конечных элементов с помощью ПК ЛИРА.
13. Квасов Ф.И., Фридляндер И.Н. Промышленные деформируемые, спеченные и литейные алюминиевые сплавы. Справочное руководство. 1984, 528 с.
14. Квасов Ф.И., Фридляндер И.Н. Промышленные алюминиевые сплавы. М.: Металлургия, 1984 г. 528 с.
15. Сабоннадьер Ж.К., Кулон Ж.Л. Метод конечных элементов и САПР. М.: Мир, 1989, 190с.
16. Розин Л.А. Метод конечных элементов в применении к упругим системам. М.: Стройиздат, 1977, 132с.
17. Штамм К., Витте Г. Многослойные конструкции: пер. с нем. М.: Стройиздат, 1983. 300с.
18. Устарханов О.М., Булгаков А.И., Гаджиев М.Д. Совершенствование моделей расчета трехслойных конструкций// Тезисы докладов XXII научно-технической конференции преподавателей, со-

трудников, аспирантов и студентов ДГТУ. Махачкала, 1999. С.52-54.

19. Хэбип Л.М. Обзор современного состояния исследований по трехслойным конструкциям // Механика.: Периодич. сб. переводов иностранных статей. -1996. Т.96, №2. - С. 119-130.
20. Пелех Б.Л., Лазыко В.А. Слоистые анизотропные пластины и оболочки с концентратами напряжений. Киев: Наук. Думка, 1982,295 с.

References:

1. A.G.Kamershteyn, V.V. Rozhdestvenskiy, M.N. Ruchimskiy – Raschet truboprovodov na prochnost'. Moskva 1963..[Kammerstein, A. G., V. V. Rozhdestvenskiy, M. N. Rucinski – Calculation of pipeline strength. Moscow 1963. (in Russ.)]
2. Aynbinder A.B., Kamershteyn A.G. Raschet magistral'nykh truboprovodov na prochnost' i ustoychivost'. Spravochnoye posobiye. M.: Nedra, 1982. - 341 s. [Ainbinder A. B., Kamenstein A. G., Calculation of pipelines for others strength and stability. Reference book. M.: Nedra, 1982. - 341 p. (in Russ.)]
3. Berezina I.V., Samoylov B.V. Osobennosti rascheta profilya magistral'nogo truboprovoda bol'shogo diametra. Transport i khraneniye nefi i nefteproduktov, 1976, JS 10, s. 15-17. [Berezina I. V., Samoylov B. V., Features of calculation of the profile of the trunk pipelinelarge diameter wires. TRANS-176 port and storage of oil and oil products, 1976, JS 10, pp. 15-17. (in Russ.)]
4. Borodavkin P.P., Sinyukov A.M. Prochnost' magistral'nykh truboprovodov. M.: Nedra, 1984. - 245 s. [Borodavkin p. P., Sinyukov A. Strength of trunk pipelines. Mmm.: Nedra, 1984. - 245 p. (in Russ.)]
5. Aleksandrov A. YA. Kurshin L. M. Trekhslonnyye plastinki i obolochki. – V– kn.: Prochnost', ustoychi-vost', kolebaniya. M.: Mashinostroyeniye, 1968, t.2. [Alexandrov A. Kurshin L. M. three-Layer plates and shells. - W-kN.: Strength, stability, vibrations. M.: Mashinostroenie, 1968, vol.2. (in Russ.)]
6. Kobelev V.N., Kovarskiy L.M., Timofeyev S.I. Raschet trekhslonnykh konstruksiy. M.: Mashinostroye-niye, 1984. [Kobelev V. N., L. M. Kovarskii, and S. I. Timofeev, Calculation of sandwich structures. M.: Mechanical Engineering, 1984. (in Russ.)]
7. Agapov V.P. Metod konechnykh elementov v statike, dinamike, i ustoychivosti prostranstvennykh tonkostennykh podkreplonnykh konstruksiy. Uchebnoye posobiye M.: Izd ASV, 2000, 152s. [Agapov V. P. finite element Method in statics, dynamics, and stability of Prostrange thin-walled reinforced structures. Textbook M.: ASV publishing house, 2000, 152c. (in Russ.)]
8. Gallager R. Metod konechnykh elementov. M.: 1984g, 424s. [Gallagher R. finite element Method. M.: 1984, 424c. (in Russ.)]
9. Gorodetskiy A.S., Yevzerov I.D. Komp'yuternyye modeli konstruksiy. M.: Izdatel'stvo Assotsiatsii stroitel'nykh vuzov. 2009g, 360str. [Gorodetskiy A. S., Evzerov I. D. Computer models of designs. M.: Publisher the Association of construction universities. 2009, 360 p. (in Russ.)]
10. Rikards R.B. Metod konechnykh elementov v teorii obolochek i plastin. Riga: Zinatne, 1988, 284s. [Rickards R. B. the finite element Method in the theory of shells and plates. Riga: Znatne, 1988, 284s. (in Russ.)]
11. Streng G., Fiks D. Teoriya metoda konechnykh elementov. M.: 1977, 350s. [Strang G., Fix D. theory of the finite element method. M.: 1977, 350C. (in Russ.)]
12. Ustarkhanov O.M., Bulgakov A.I., Muselemov KH.M., Ustarkhanov T.O. Zhurnal «Izvestiya vysshikh ucheb-nykh zavedeniy» «Tekhnicheskiye nauki». 2012, №5. Raschet trekhslonnykh balok s uchetom kleyevogo shva po metodu konechnykh elementov s pomoshch'yu PK LIRA. [Ustarhanov O. M., Bulgakov A. I., Muslimov H. M., T. O. Ustarhanov Journal "News of higher educational institutions "" Technical Sciences». 2012, №5. Calculation of three-layer beams taking into account the adhesive seam method finite elements using PC LIRA. (in Russ.)]
13. Kvasov F.I., Fridlyander I.N. Promyshlennyye deformiruyemyye, spechennyye i liteynyye alyuminiyevyye splavy. Spravochnoye rukovodstvo. 1984, 528 s. [F. I. Kvasov, I. N. Fridlyander. Industrial deformable, sintered and whether aluminum alloys. Reference guide. 1984, 528 p. (in Russ.)]
14. Kvasov F.I., Fridlyander I.N. Promyshlennyye alyuminiyevyye splavy. M.: Metallurgiya, 1984 g, 528 s. [F. I. Kvasov, I. N. Fridlyander. Industrial aluminum alloys. M.: Metallarge, 1984, 528 p.(in Russ.)]
15. Sabonnad'yer ZH.K., Kulon ZH.L. Metod konechnykh elementov i SAPR. M.: Mir, 1989, 190s. [Sabandar J. C., Coulomb J. L., finite element Method and CAD. M.: Mir, 1989, 190C. (in Russ.)]
16. Rozin L.A. Metod konechnykh elementov v primenenii k uprugim sistemam. M.: Stroyizdat, 1977, 132s. [L. A. Rozin, the finite element Method applied to elastic systems. Mmm.: Stroyizdat, 1977,

- 132s. (inRuss.)]
17. Shtamm K., Vitte G. Mnogosloynnye konstruksii: per. s nem. M.: Stroyizdat, 1983. 300s. [Strain K., Witte G. Multilayer structures: lane with it. M.: Stroyizdat, 1983. 300с. (in Russ.)]
 18. Ustarkhanov O.M., Bulgakov A.I., Gadzhiyev M.D. Sovershenstvovaniye modeley rascheta trekhsloynnykh konstruksiy// Tezisy dokladov XXII nauchno-tekhnicheskoy konferentsii prepodavateley, sotrudnikov, aspirantov i studentov DGTU. Makhachkala, 1999. S.52-54. [Ustarkhanov O. M., Bulgakov A. I., Gadzhiev M. D. improvement of the models of TA three-layer structures// Abstracts of XXII scientific and technical conference rations of teachers, employees, post-graduates and students of DSTU. Makhachkala, 1999. P. 52-54. (in Russ.)]
 19. Khebir J.I.M. Obzor sovremennogo sostoyaniya issledovaniy po trekhsloynnym konstruksiyam\\ Mekhanika.: Periodich. sb. perevodov inostrannykh statey. -1996. T.96, №2. - S. 119-130. [Habib J.I.M. a review of the current state of research on three-layer con structures\\ Mechanics.: Periodic. collection of translations of foreign articles. -1996. Vol. 96, №2. - P. 119-130. (in Russ.)]
 20. Pelekh B.L., Laz'ko V.A. Sloistyye anizotropnyye plastiny i obolochki s kontsentratami napryazheniy. Kiyev: Nauk. Dumka, 1982,295 s. [Peleh, B. L., lazko, V., Laminates, anisotropic plates and shells, L. Tami tensions. Kiev: Sciences. Dumka, S. 1982,295(in Russ.)]

Сведения об авторах:

Булгаков Александр Исакович - кандидат технических наук, доцент, кафедра строительных конструкций и гидротехнических сооружений.

Вишталов Раджаб Исабекович - кандидат технических наук, доцент, кафедра строительных конструкций и гидротехнических сооружений.

Муселемов Хайрулла Магомедмуратович - кандидат технических наук, доцент, кафедра строительных конструкций и гидротехнических сооружений.

Устарханов Осман Магомедович - доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой строительных конструкций и гидротехнических сооружений.

Information about the authors.

Aleksandr I. Bulgakov – Cand. Sci. (Technical), Assoc. Prof., Department of Construction structures and hydraulic engineering structures.

Rajab I. Vishtalov – Cand. Sci. (Technical), Assoc. Prof., Department of Construction structures and hydraulic engineering structures.

Hayrulla M. Muselemov –Cand. Sci. (Technical), Assoc. Prof., Department of Construction structures and hydraulic engineering structures.

Osman M. Ustarkhanov – Dr. Sci. (Technical), Prof., Department of Construction structures and hydraulic engineering structures.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 15.03.2018.

Принята в печать 10.05.2018.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 15.03.2018.

Accepted for publication 10.05.2018.

Для цитирования: Купчикова Н.В., Николаенко М.Н., Овсянникова Т.Ю. Уровень развития градостроительной среды на урбанизированных территориях Астраханской области. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2018; 45 (2): 200-208.
DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-2-200-208

For citation: Kupchikova N.V., Nikolaenko M.N., Ovsyannikova T.Yu. Effect of the development Level of the urban planning environment on the urbanised territories of the Astrakhan region. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2018; 45 (2): 200-208. (in Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-2-200-208

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК: 69.003

DOI: 10.21822/2073-6185-2018-45-2-200-208

УРОВЕНЬ РАЗВИТИЯ ГРАДОСТРОИТЕЛЬНОЙ СРЕДЫ НА УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЯХ АСТРАХАНСКОЙ ОБЛАСТИ

Купчикова Н.В.³, Николаенко М.Н.², Овсянникова Т.Ю.¹

¹⁻²Томский государственный архитектурно-строительный университет,
¹⁻²634003, г. Томск, пл. Соляная 2, Россия,

³Астраханский государственный архитектурно-строительный университет,
³414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 18, Россия,

¹e-mail: tatovs@mail.ru, ²e-mail: nikolaenko.m.n@tsuab.ru, ³e-mail: tehnologia@ausu.ru

Резюме. Цель. Цель настоящего исследования состоит в оценке уровня развития градостроительной среды на урбанизированных территориях Астраханской области и в определении на основе полученных данных приоритетных направлений деятельности строительного комплекса. **Метод.** Оценка показателей развития градостроительной среды основана на методах экономико-статистического и компаративного анализа и индексном методе. **Результат.** На основе предложенной методики проведен расчет показателей развития градостроительной среды городов Астраханской области. Установлены приоритетные направления инвестирования и развития урбанизированных территорий. **Вывод.** Методика оценки уровня развития градостроительной среды позволяет таргетировать деятельность строительного комплекса на повышение уровня развития градостроительной среды. В статье приведены результаты оценки уровня развития градостроительной среды на урбанизированных территориях Астраханской области, на ее основе определены приоритетные направления деятельности строительного комплекса, представлены некоторые результаты межрегиональных исследований.

Ключевые слова: градостроительная среда, строительный комплекс, оценка деятельности строительного комплекса, планирование

ECONOMIC SCIENCE

EFFECT OF THE DEVELOPMENT LEVEL OF THE URBAN PLANNING ENVIRONMENT ON THE URBANISED TERRITORIES OF THE ASTRAKHAN REGION

*Natalya V. Kupchikova*³, *Mariya N. Nikolaenko*², *Tatiana Yu. Ovsianikova*¹

¹⁻²Tomsk State University of Architecture and Building,

¹⁻²2 Solyanaya sq., Tomsk 634003, Russia,

¹Astrakhan State University of Architecture and Civil Engineering

¹18 Tatishcheva Str., Astrakhan 414056, Russia

¹e-mail: tatovs@mail.ru, ²e-mail: nikolaenko.m.n@tsuab.ru, ³e-mail: tehnologia@aucu.ru

Abstract Objectives The aim of the study is to assess the level of development of the urban planning environment in the urbanised areas of the Astrakhan region and to determine the priority areas of the construction complex on the basis of the data obtained. **Methods** The evaluation of development indicators for the urban planning environment is based on the methods of economic-statistical and comparative analysis as well as the index method. **Results** Based on the proposed methodology, a calculation of the development indices of the urban planning environment of the cities of the Astrakhan region is carried out. Priority directions of investment and development of urbanised territories are identified. **Conclusion** The methodology for assessing urban planning development allows the activities of the construction complex to be targeted towards an improvement of the urban planning environment. The article presents the results of assessing the development level of the urban planning environment in the urbanised areas of the Astrakhan region. Based on this assessment, priority directions of the construction complex activities are determined and some results of interregional research are presented.

Keywords: urban planning environment, construction complex, assessment of the activities of the construction complex, planning

Введение. В постиндустриальной экономике в межстрановой конкуренции за человеческий и инвестиционный капитал качество среды жизнедеятельности людей и ведения бизнеса становятся одними из основных конкурентных преимуществ территорий.

Пространственно-материальную основу для формирования благоприятных условий жизни создает строительный комплекс как градоформирующая отрасль.

Мультипликативный эффект, оказываемый деятельностью строительного комплекса, отмечается многими исследователями. Так, по мнению Т.В. Светник и М.В. Матвеевой, строительный комплекс может стать «локомотивом» экономического роста [1-2]. П.Г. Грабовый справедливо утверждает, что инвестиционно-строительная деятельность влияет на результативность смежных отраслей экономики и в целом на качество жизни населения [3].

Действительно, строительный комплекс играет важную роль в социально-экономическом развитии страны. В 2015 г. в состав строительного комплекса Российской Федерации входили 235351 строительная организация, а совокупная численность работников, занятых в строительстве, составила около 5,7 млн чел., что соответствовало доле в 8,3 % занятых в экономике страны [4].

Строительный комплекс осуществляет весомый вклад в валовой внутренний продукт и валовой региональный продукт. Так, по нашим оценкам, в 2016 г. строительный комплекс с учетом производства строительных материалов и конструкций и оказания услуг генерировал 9 % валового внутреннего продукта Российской Федерации. Вклад строительства в валовой региональный продукт федеральных округов России в 2015 г. составил около 8 % [5]. В некоторых федеральных округах вклад строительной отрасли в общий объем ВРП значительно больше данного значения. Так, в Южном федеральном округе на вид экономической де-

тельности «Строительство» в общей структуре ВРП в 2015 г. пришлось 10,1 % общего объема, в Северо-Кавказском федеральном округе – 11,3 %.

При этом основная часть строительной деятельности осуществляется на урбанизированных территориях. Так, в Сибирском федеральном округе в городах осуществляется большая доля инвестиций в основной капитал, на их территории концентрируются до 85 % создающихся или реконструируемых основных фондов организаций, в городах возводится более 75 % площади всех строящихся жилых домов [6]. В других федеральных округах города также являются основными точками приложения строительной активности.

Постановка задачи. Строительный комплекс является градоформирующей отраслью, миссией которой является создание материальных факторов производства, являющихся основой экономического роста, и объектов капитального строительства, посредством которых удовлетворяются жизненно важные потребности населения [7-8].

В процессе своей деятельности строительный комплекс создает широкий спектр объектов капитального строительства различного назначения, которые воспринимаются человеком в совокупности как единая система – градостроительная среда. В связи с этим при анализе деятельности строительного комплекса необходимо оценивать качество не только отдельных объектов капитального строительства, их элементов и видов работ, но и качество градостроительной среды в целом как совокупности объектов, создаваемых в процессе осуществления производственной деятельности комплекса строительных организаций и формирующих антропогенную составляющую среды жизнедеятельности населения.

Отметим, что необходимость оценки характеристик городской территории в целом и значимость этих характеристик для развития человека осознаны многими исследователями и практиками [9–12]. При оценке функционирования и развития предприятий строительного комплекса наряду с количественными параметрами их финансово-хозяйственной деятельности, качественными показателями системы управления, целеполагания и согласованности подсистем [14], необходимо учитывать и состояние градостроительной среды как итогового результата деятельности строительного комплекса. Формирование и развитие благоприятной градостроительной среды, обеспечивающей удовлетворение базовых потребностей человека, должно стать стратегической целью деятельности строительного комплекса.

Методы исследования. Индикаторами достижения обозначенной цели выступают показатели, характеризующие уровень развития градостроительной среды. Предложенная методика оценки уровня развития градостроительной среды основывается на расчете частных и агрегированных показателей. В качестве целевого индикатора деятельности строительного комплекса предложен интегральный показатель «индекс развития градостроительной среды» [8, 13].

Посредством используемой в методике системы показателей развития градостроительной среды, возможно дать интегральную оценку деятельности строительного комплекса, выполнить межрегиональные сопоставления и определить приоритетные направления строительной деятельности, нацеленные на улучшение среды проживания. Для апробации предложенной методики и подтверждения ее применимости для планирования деятельности строительного комплекса была проведена оценка уровня развития градостроительной среды на урбанизированных территориях Астраханской области и проведены сопоставления с городскими территориями других регионов.

Приведенные в статье результаты оценки уровня развития градостроительной среды были получены на основе использования предложенной методики [8, 13], базирующейся на методах экономико-статистического и компаративного анализа и индексном методе. Согласно методике, для оценки уровня развития градостроительной среды производится расчет 15 частных и агрегированных показателей, разделенных на две группы [8].

Рассчитываются значения данных показателей для городов конкретного региона и их средние значения для городов России в целом. Далее определяются нормированные значения данных показателей путем деления значений для городов региона на средние значения для городов России. На основе нормированных значений определяется интегральный индекс разви-

тия градостроительной среды I_{UBED} [15].

Информационной основой исследования являются сведения российских и зарубежных статистических систем Евростата, Единой межведомственной информационно-статистической системы (ЕМИСС), Федеральной службы государственной статистики России и ее Территориальных органов, материалы, опубликованные в специальной научной литературе и периодической печати, размещенные в сети Интернет.

Обсуждение результатов. По предложенной методике была произведена оценка уровня развития градостроительной среды урбанизированных территорий всех регионов России за период с 2010 по 2015 гг.

В 2015 г. в 49 из 80 рассмотренных субъектов Российской Федерации значение индекса развития градостроительной среды I_{UBED} для урбанизированных территорий находилось в диапазоне от 0,8 до 1,2. Значения данного индекса для урбанизированных территорий Южного и Сибирского федеральных округов приведены в табл. 1.

Как видно из приведенных данных, максимальный уровень развития градостроительной среды в рассмотренных регионах наблюдается в городах Краснодарского края. Города Астраханской области характеризуются относительно высоким уровнем развития градостроительной среды: в 2015 г. индекс I_{UBED} составил 1,103.

Индекс I_{UBED} в них превышает 1, что свидетельствует, согласно методике, о том, что уровень развития градостроительной среды в городах данного региона выше, чем в среднем в городах России.

Для сравнения расчеты показали, что в преобладающем большинстве городов регионов Сибирского федерального округа наблюдается противоположная ситуация. Так, в городах Томской области уровень развития градостроительной среды близок, но все же не достигает среднероссийского уровня (табл. 1).

Таблица 1. Значения индекса развития градостроительной среды I_{UBED} для урбанизированных территорий Южного и Сибирского федеральных округов в 2010-2015 гг.
Table 1. Index of Urban Built Environment Development of urban areas in South Federal District and Siberian Federal District in 2010–2015

Субъект Федерации	Год	2010	2011	2012	2013	2014	2015
	Южный федеральный округ						
Города Республики Адыгея		1,389	1,378	1,433	1,388	1,407	1,407
Города Республики Калмыкия		0,818	0,820	0,808	0,822	0,843	0,840
Города Краснодарского края		1,518	1,479	1,401	1,452	1,501	1,504
Города Астраханской области		1,209	1,194	1,117	1,123	1,118	1,103
Города Волгоградской области		0,990	0,888	0,860	0,851	0,852	0,853
Города Ростовской области		1,256	1,255	1,205	1,202	1,197	1,200
Сибирский федеральный округ							
Города Республики Алтай		0,918	0,917	0,902	0,911	0,910	0,909
Города Республики Бурятия		0,857	0,859	0,808	0,760	0,763	0,763
Города Республики Тыва		0,681	0,712	0,705	0,699	0,707	0,705
Города Республики Хакасия		0,947	0,972	0,932	0,954	0,953	0,953
Города Алтайского края		0,984	0,980	0,870	0,865	0,877	0,880
Города Забайкальского края		0,730	0,721	0,702	0,707	0,695	0,693
Города Красноярского края		0,884	0,865	0,836	0,855	0,857	0,859
Города Иркутской области		0,848	0,814	0,782	0,786	0,782	0,783
Города Кемеровской области		0,846	0,850	0,833	0,832	0,853	0,854
Города Новосибирской области		1,082	1,052	1,008	1,002	1,004	1,004
Города Омской области		1,001	0,997	0,955	0,961	0,967	0,965
Города Томской области		0,941	0,931	0,914	0,927	0,953	0,954

Расчеты показывают, что в городах Астраханской области наблюдается отрицательная динамика уровня развития градостроительной среды: с 2010 г. интегральный показатель I_{UBED}

снизился почти на 9 %.

Значение интегрального индекса развития градостроительной среды дает представление об общем уровне развития среды жизнедеятельности, сформированной строительным комплексом в городах региона. Оценить уровень развития отдельных компонентов градостроительной среды позволяют нормированные показатели.

На их основе возможно определить перечень приоритетных направлений деятельности строительного комплекса, нацеленных на улучшение условий жизни населения на урбанизированных территориях [16-21].

Значения нормированных показателей развития градостроительной среды городов Астраханской области в период с 2010 по 2015 гг. приведены в табл. 2.

Таблица 2. Нормированные показатели качества градостроительной среды урбанизированных территорий Астраханской области в период 2010–2015 гг.

Table 2. Normalized indicators of urban built environment development in urban areas of Astrakhan Region in 2010–2015

Наименование показателя	Значение					
	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Показатели обеспеченности населения объектами капитального строительства						
Обеспеченность жильем	0,982	0,978	0,974	0,992	1,000	0,983
Обеспеченность объектами социальной инфраструктуры	1,062	1,060	1,042	1,053	1,052	0,959
Обеспеченность культурно-образовательными учреждениями	0,812	0,812	0,817	0,828	0,807	0,828
Обеспеченность объектами спортивного назначения	0,872	0,724	0,519	0,520	0,527	0,531
Обеспеченность объектами общественного питания	1,163	1,164	1,189	1,198	1,181	1,198
Обеспеченность торговыми объектами	1,187	1,189	1,144	1,172	1,215	1,211
Обеспеченность объектами транспортной инфраструктуры	0,906	0,945	0,922	0,912	0,914	0,811
Обеспеченность зелеными насаждениями	0,151	0,145	0,140	0,146	0,145	0,144
Показатели состояния объектов капитального строительства						
Степень благоустройства жилищного фонда	0,985	0,986	0,985	0,979	1,016	0,968
Степень ветхости и аварийности жилищного фонда	0,895	0,898	0,905	0,883	0,903	0,908
Доля жилищного фонда с износом менее 15%	2,194	2,084	2,004	1,949	1,796	1,769
Техническое состояние зданий социальных объектов	0,946	0,991	0,957	0,936	0,950	0,970
Техническое состояние зданий культурно-образовательных учреждений	0,953	0,914	0,923	0,959	0,944	0,947
Степень износа коммунальной инфраструктуры	1,188	1,260	1,178	1,222	1,222	1,032
Состояние автомобильных дорог	1,041	1,007	0,993	0,993	0,993	1,186

Сопоставление показателей развития градостроительной среды урбанизированных территорий Астраханской области в 2015 г. со среднероссийскими показателями приведены на рис. 1.



Рис. 1. Нормированные показатели развития градостроительной среды городов Астраханской области в 2015 г.

Fig. 1. Normalized indicators of urban built environment development in urban areas of Astrakhan Region in 2015

Проведенный анализ показывает, что города Астраханской области по показателям обеспеченности торговыми объектами и объектами общественного питания, а также по доле жилищного фонда с износом менее 15 % и степени износа коммунальной инфраструктуры превышают среднероссийский городской уровень.

По остальным компонентам развития градостроительной среды урбанизированные территории оцениваемого региона не достигают среднероссийских городских значений.

Города Астраханской области характеризуются низкой обеспеченностью спортивными объектами и зелеными насаждениями, а также относительно невысокой обеспеченностью объектами транспортной инфраструктуры и культурно-образовательными учреждениями. Направления, характеризующие перечисленными показателями, рекомендуется определить в качестве приоритетных для деятельности строительного комплекса региона, что должно отразиться на структурах инвестиционных потоков и ввода объектов капитального строительства.

Вывод. Предложенная методика оценки уровня развития градостроительной среды позволяет производить сопоставления деятельности региональных строительных комплексов не только по интегральному индексу, но и по частным и агрегированным показателям, отражающим состояния отдельных компонентов градостроительной среды.

Такое сопоставление позволяет выявить конкурентные преимущества урбанизированных территорий регионов, либо, напротив, выявить проблемные направления, требующие принятия соответствующих управленческих решений в градостроительной деятельности.

Библиографический список:

1. Матвеева, М.В. К вопросу целевой фокусировки инвестиционно-строительной деятельности в современных условиях развития национальной экономики // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. – 2013. – № 1 (4). – С. 46–55.
2. Светник, Т.В. Трансформация отрасли строительства в действенный локомотив экономического роста // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2014. – № 12. – С. 336–343.
3. Грабовый, П.Г. Территории опережающего социально-экономического развития – точки роста в дальневосточном федеральном округе // Недвижимость: экономика, управление. – 2016. – № 1. – С. 6–11.
4. Строительств России. 2016: Стат. сб. / Росстат. – М., 2016. – 111 с.
5. Структура ВРП по видам экономической деятельности / Федеральная служба государственной статистики. – URL: http://www.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_main/rosstat/ru/statistics/accounts/#.
6. Регионы России. Основные социально-экономические показатели городов. 2016: Стат. сб. / Росстат. – М., 2016. – 442 с.
7. Овсянникова, Т.Ю., Преображенская, М.Н. Градостроительная среда как пространственно-материальная основа городского развития // Вестник ТГАСУ. – 2014. – № 3. – С. 191–200
8. Николаенко, М.Н. Градоформирующая миссия строительного комплекса: формирование комфортной среды жизнедеятельности // Вестник ТГАСУ. – 2016. – № 5. – С. 83–90.
9. Градостроительная доктрина Российской Федерации [Электронный ресурс] / Коллектив авторов, руководитель Г.В. Есаулов. – М.: Экон-информ, 2014. – 30 с. – Режим доступа: <http://www.sro-mgi.ru/docs/drugoe/grad-doktrina.pdf>
10. Колчунов, В.И., Скобелева, Е.А., Купчикова, Н.В. Сравнительный анализ уровня реализации функции города «жизнеобеспечение» в центральном и южном федеральных округах РФ // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. – 2014. – № 1 (5). – С. 22–26.
11. Кулешова, Г.И. Города в сражении за человеческий ресурс: опыты модернизации // Городское управление. – 2012. – № 9 (194). – С. 47–58.
12. Федоров, В.С., Ануфриев, Д.П., Купчикова, Н.В. Устойчивость развития функций «жизнеобеспечение» в областях центрального и южного федеральных округов РФ // Перспективы развития строительного комплекса. – 2014. – С. 339–345.
13. Ovsiannikova, T., Nikolaenko, M. Sustainable urban built environment: Modern management concepts and evaluation methods // AIP Conference Proceedings. – Volume 1800, Issue 1 10.1063/1.4973062 [Электронный ресурс]. – URL <http://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.4973062>.
14. Цопа, Н.В. Концептуальные основы управляемого развития инвестиционно-строительного комплекса // Актуальные проблемы экономики и менеджмента. – 2015. – № 2 (06). – С. 84–91.
15. Овсянникова, Т.Ю., Николаенко, М.Н. Оценка качества градостроительной среды на урбанизированных территориях: межрегиональные сопоставления // Вестник НГУ. Серия: Социально-экономические науки. – 2015. – Т. 15. – Вып. 2. – С. 120–131.
16. Калашников С.Ю., Калашникова Ю.С. Анализ структуры транспортной системы и выявление негативных факторов воздействия на городскую среду // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. 2016. № 2 (14). С.97-102.
17. Гурова Е.В., Калашникова Ю.С. Михеева Т.А., Капитонова И.С. Социальные аспекты и градостроительные перспективы реконструкции промышленной застройки // Социально-экономические и технологические проблемы развития строительного комплекса региона. Наука. Практика. Образование. Материалы III Всероссийской научно-технической конференции. Волгоград. 2009. С.444-445.
18. Калашников С.Ю., Калашникова Ю.С. Особенности идентификации понятия «качество жизни» жителями линейных градостроительных образований // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. 2016. № 1 (13). С.3-7.
19. Колясников В.А. Развитие понятия «городская агломерация» // Академический вестник УРАЛНИИПРО-ЕКТ РААСН. 2015. № 2. С.10-15.
20. Багаутдинова Т.М., Савина О.В. Обработка и исследование рыночной информации, необходимой для определения стоимости объектов недвижимости // Потенциал интеллектуально-одаренной молодежи – развитию науки и образования. Материалы V Международного форума молодых ученых, студентов и школьников. Астрахань. 2016. С.449-453.
21. Купчикова Н.В., Чумакова А.В. Рейтинговая оценка устойчивости среды обитания жилого комплекса по системе «Зеленое строительство» // Перспективы развития строительного комплекса. – 2014 С. 345.

References:

1. Matveeva M.V. K voprosu tselevoi fokusirovki investitsionno-stroitel'noi deyatel'nosti v sovremennykh usloviyakh razvitiya natsional'noi ekonomiki. Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost'. 2013;1(4):46–55. [Matveeva M.V. On the issue of the targeted focus of investment and construction activities in the current conditions of the national economy development. Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate. 2013;1(4):46–55. (in Russ.)]

2. Svetnik T.V. Transformatsiya otrasli stroitel'stva v deistvennyi lokomotiv ekonomicheskogo rosta. Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2014;12:336–343.[Svetnik T.V. Transformation of the construction industry into an efficient locomotive of economic growth. Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2014;12:336–343. (in Russ.)]
3. Grabovyi P.G. Territorii operezhayushchego sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya – tochki rosta v dal'nevostochnom federal'nom okruge. Nedvizhimost': ekonomika, upravlenie. 2016;1:6–11.[Grabovyi P.G. Territories of advanced socio-economic development are the points of growth in the Far Eastern Federal District. Real estate: economics, management. 2016;1:6–11. (in Russ.)]
4. Stroitel'stvo v Rossii. 2016: Stat. sb. / Rosstat. M.; 2016. 111 s. [Construction in Russia. 2016: Stat. coll. / Rosstat. M.; 2016. 111 p. (in Russ.)]
5. Struktura VRP po vidam ekonomicheskoi deyatel'nosti / Federal'naya sluzhba gosudarstvennoi statistiki. – URL: http://www.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_main/rosstat/ru/statistics/accounts/#. [GRP structure according to the types of economic activity / Federal'naya sluzhba gosudarstvennoi statistiki. – URL: http://www.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_main/rosstat/ru/statistics/accounts/#. (in Russ.)]
6. Regiony Rossii. Osnovnye sotsial'no-ekonomicheskie pokazateli gorodov. 2016: Stat. sb. / Rosstat. M.; 2016. 442 s. [Regions of Russia. The main socio-economic indicators of cities. 2016: Stat. coll. / Rosstat. M.; 2016. 442 p. (in Russ.)]
7. Ovsyannikova T.Yu., Preobrazhenskaya M.N. Gradostroitel'naya sreda kak prostranstvenno-material'naya osnova gorodskogo razvitiya. Vestnik TGASU. 2014;3:191–200.[Ovsyannikova T.Yu., Preobrazhenskaya M.N. Urban planning environment as the spatial and material basis of urban development. Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building. 2014;3:191–200. (in Russ.)]
8. Nikolaenko M.N. Gradoformiruyushchaya missiya stroitel'nogo kompleksa: formirovanie komfortnoi sredy zhiznedeyatel'nosti. Vestnik TGASU. 2016;5:83–90.[Nikolaenko M.N. City forming mission of the construction complex: the formation of a comfortable life environment. Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building. 2016;5:83–90. (in Russ.)]
9. Gradostroitel'naya doktrina Rossiiskoi Federatsii [Elektronnyi resurs] / Kollektiv avtorov, rukovoditel' G.V. Esaulov. M.: Ekon-inform; 2014. 30 s. Rezhim dostupa: <http://www.sro-mri.ru/docs/drugoe/grad-doktrina.pdf> [Urban planning doctrine of the Russian Federation [Electronic resource] / G.V. Esaulov et al. M.: Ekon-inform; 2014. 30 p. Available at: <http://www.sro-mri.ru/docs/drugoe/grad-doktrina.pdf> (in Russ.)]
10. Kolchunov V.I., Skobeleva E.A., Kupchikova N.V. Sravnitel'nyi analiz urovnya realizatsii funktsii goroda “zhizneobespechenie” v tsentral'nom i yuzhnom federal'nykh okrugakh RF. Biosfernaya sovmestimost': chelovek, region, tekhnologii. 2014;1(5):22–26. [Kolchunov V.I., Skobeleva E.A., Kupchikova N.V. Comparative analysis of the level of realisation of the “life supporting” city function in the Central and Southern federal districts of the Russian Federation. Biospheric compatibility: human, region, technologies. 2014;1(5):22–26. (in Russ.)]
11. Kuleshova G.I. Goroda v srazhenii za chelovecheskii resurs: opyty modernizatsii. Gorodskoe upravlenie. 2012;9(194):47–58.[Kuleshova G.I. Cities in the battle for the human resource: the experiences of modernisation. Gorodskoe upravlenie. 2012;9(194):47–58. (in Russ.)]
12. Fedorov V.S., Anufriev D.P., Kupchikova N.V. Ustoichivost' razvitiya funktsii “zhizneobespechenie” v oblastyakh tsentral'nogo i yuzhnogo federal'nykh okrugov RF. Perspektivy razvitiya stroitel'nogo kompleksa. Astrakhan'; 2014. S. 339–345. [Fedorov V.S., Anufriev D.P., Kupchikova N.V. Sustainability of the development of “life supporting” functions in the regions of the Central and Southern federal districts of the Russian Federation. Prospects for the development of the building complex. Astrakhan; 2014. P. 339–345. (in Russ.)]
13. Ovsyannikova T., Nikolaenko M. Sustainable urban built environment: Modern management concepts and evaluation methods. AIP Conference Proceedings. Volume 1800, Issue 1 10.1063/1.4973062 [Elektronnyi resurs]. – URL <http://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.4973062>.
14. Tsopa N.V. Kontseptual'nye osnovy upravlyаемого razvitiya investitsionno-stroitel'nogo kompleksa. Aktual'nye problemy ekonomiki i menedzhmenta. 2015;2(06):84–91. [Tsopa N.V. Conceptual bases of the managed development of the investment and construction complex. Actual Problems of Economics and Management. 2015;2(06):84–91. (in Russ.)]
15. Ovsyannikova T.Yu., Nikolaenko M.N. Otsenka kachestva gradostroitel'noi sredy na urbanizirovannykh territoriyakh: mezhregional'nye sopostavleniya. Vestnik NGU. Seriya: Sotsial'no-ekonomicheskie nauki. 2015;15(2):120–131. [Ovsyannikova T.Yu., Nikolaenko M.N. Quality assessment of the urban environment in urban areas: inter-regional comparisons. Vestnik NSU. Series: Social and Economic Sciences. 2015;15(2):120–131. (in Russ.)]
16. Kalashnikov S.Yu., Kalashnikova Yu.S. Analiz struktury transportnoi sistemy i vyyavlenie negativnykh faktorov vozdeistviya na gorodskuyu sredu. Biosfernaya sovmestimost': chelovek, region, tekhnologii. 2016;2(14):97–102. [Kalashnikov S.Yu., Kalashnikova Yu.S. Structural analysis of the transport system and identification of negative factors affecting the urban environment. Biospheric compatibility: human, region, technologies. 2016;2(14):97–102. (in Russ.)]
17. Gurova E.V., Kalashnikova Yu.S. Mikheeva T.A., Kapitonova I.S. Sotsial'nye aspekty i gradostroitel'nye perspektivy rekonstruktsii promyshlennoi zastroiki. Materialy III Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii “Sotsial'no-ekonomicheskie i tekhnologicheskoe problemy razvitiya stroitel'nogo kompleksa regiona. Nauka. Praktika. Obrazovanie”. Volgograd; 2009. S.444–445. [Gurova E.V., Kalashnikova Yu.S. Mikheeva T.A., Kapitonova I.S.

- Social aspects and town-planning prospects of reconstruction of industrial buildings. Materials of the III All-Russian Scientific and Technical Conference "Socio-economic and technological problems of the development of the construction complex of the region. Science. Practice. Education". Volgograd; 2009. P.444-445. (in Russ.)]
18. Kalashnikov S.Yu., Kalashnikova Yu.S. Osobennosti identifikatsii ponyatiya "kachestvo zhizni" zhitelyami lineinykh gradostroitel'nykh obrazovaniy. Biosfernaya sovместimost': chelovek, region, tekhnologii. 2016;1(13):3-7. [Kalashnikov S.Yu., Kalashnikova Yu.S. Features of "quality of life" concept identification by residents of linear urban structures. Biospheric compatibility: human, region, technologies. 2016;1(13):3-7. (in Russ.)]
 19. Kolyasnikov V.A. Razvitiye ponyatiya "gorodskaya aglomeratsiya". Akademicheskii vestnik URALNIIPROEKT RAASN. 2015;2:10-15. [Kolyasnikov V.A. Development of the "urban agglomeration" concept. Academic Bulletin of URALNIIPROEKT RAASN. 2015;2:10-15. (in Russ.)]
 20. Bagautdinova T.M., Savina O.V. Obrabotka i issledovanie rynochnoi informatsii, neobkhodimoi dlya opredeleniya stoimosti ob'ektov nedvizhimosti. Materialy V Mezhdunarodnogo foruma molodykh uchenykh, studentov i shkol'nikov "Potentsial intellektual'no-odarennoi molodezhi – razvitiyu nauki i obrazovaniya". Astrakhan'; 2016. S.449-453. [Bagautdinova T.M., Savina O.V. Processing and research of market information necessary for determining the value of real estate. Materials of the V International forum of young scientists, students and schoolchildren "Potential of intellectually gifted youth - the development of science and education". Astrakhan; 2016. P.449-453. (in Russ.)]
 21. Kupchikova N.V., Chumakova A.V. Reitingovaya otsenka ustoichivosti sredy obitaniya zhilogo kompleksa po sisteme "Zelenoe stroitel'stvo". Perspektivy razvitiya stroitel'nogo kompleksa. Astrakhan'; 2014. S. 345. [Kupchikova N.V., Chumakova A.V. Rating assessment of the sustainability of the living environment of a residential complex in the "Green Building" system. Prospects for the development of the building complex. Astrakhan; 2014. P. 345. (in Russ.)]

Сведения об авторах.

Овсянникова Татьяна Юрьевна – доктор экономических наук, профессор, заведующая кафедрой экспертизы и управления недвижимостью.

Николаенко Мария Николаевна – старший преподаватель кафедры экспертизы и управления недвижимостью.

Купчикова Наталья Викторовна – кандидат технических наук, доцент, заведующая кафедрой промышленного и гражданского строительства.

Information about the authors.

Tatiana Yu. Ovsiannikova – Dc. Sci. (Economics), Prof., Head of Department of Expertise and Real Estate Management.

Mariya N. Nikolaenko – Senior Lecturer, Department of Expertise and Real Estate Management.

Natalya V. Kupchikova – Cand. Sci. (Technical), Assoc. Prof., Head of Industrial and Civil Engineering.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 10.03.2018.

Принята в печать 10.06.2018.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 10.03.2018.

Accepted for publication 10.06.2018.

Для цитирования: Магомедов М.Г., Павлюченко Е.И. Системный подход к управлению взаимодействием участников инвестиционного процесса в строительстве. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2018; 45 (2): 209-219. DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-2-209-219

For citation: Magomedov M.G., Pavlyuchenko E. I. Systemic approach to interaction management of participants of the investment process in construction. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2018; 45 (2): 209-219. (in Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-2-209-219

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК: 690

DOI: 10.21822/2073-6185-2018-45-2-209-219

СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К УПРАВЛЕНИЮ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ УЧАСТНИКОВ ИНВЕСТИЦИОННОГО ПРОЦЕССА В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Магомедов М.Г.², Павлюченко Е.И.¹

¹⁻²Дагестанский государственный технический университет,

¹⁻²367026 г. Махачкала, пр. И. Шамиля 70, Россия,

¹e-mail: elenamars2015@gmail.com, ²e-mail: MagomedovMG@roskazna.ru

Резюме. Цель. Целью исследования является применение системного подхода к развитию организационных форм и методов управления участниками инвестиционного процесса в строительстве. **Метод.** Методика исследования основывалась на теоретическом изучении, аналитическом обобщении и систематизации нормативно-законодательных основ, концептуальных положений и сложившейся практики организации взаимодействия участников инвестиционного процесса в строительстве. Методами исследования являются системный и ситуационный подходы, статистический анализ; метод графических изображений. **Результат.** Аналитически обобщено действующее законодательное обеспечение инвестиционной деятельности в строительстве. Исследованы современные организационно-экономические формы взаимодействия основных участников в сфере инвестиционных отношений в строительстве; раскрыты, особенности их включения в инвестиционный процесс. Предложено развитие механизма, позволяющего реализовать интересы всех участников инвестиционного процесса в строительстве без ущерба для заказчика, подрядчика, инвестора, приносящего в итоге синергетический эффект. Функционально обусловлена роль государства в сохранении контроля за реализацией инвестиционных проектов в строительстве. Предложены эффективные формы и методы реализации организационно-экономического механизма взаимодействия участников инвестиционного процесса в строительстве, обеспечивающие решение ключевых вопросов инвестиционно-строительной сферы, ориентированных на разработку и выдвижение альтернативных вариантов инвестиционно-проектных решений, управление корпоративными ресурсами и организацию финансирования инвестиций в строительство. **Вывод.** Системный подход к управлению участниками инвестиционного процесса в строительстве позволит реализовать потребность инвестиционно-строительного комплекса в высокоэффективных формах организации и методах реализации инвестиционных проектов. Для преодоления существующих противоречий, характерных для инвестиционных процессов, необходимо развивать и внедрять стимулирующие меры, которые объединили бы интересы всех участников строительства.

Ключевые слова: инвестиции, строительство, участники, организационно-правовые формы, интересы, взаимодействие

ECONOMIC SCIENCE

SYSTEMIC APPROACH TO INTERACTION MANAGEMENT OF PARTICIPANTS OF THE INVESTMENT PROCESS IN CONSTRUCTION

Magomed G. Magomedov², Elena I. Pavlyuchenko¹

¹⁻²Daghestan State Technical University,

¹⁻²70 I.Shamilya Ave., Makhachkala 367026, Russia,

¹e-mail: elenamars2015@gmail.com, ²e-mail: MagomedovMG@roskazna.ru

Abstract Objectives The aim of the study is to apply a systemic approach to the development of organisational forms and management methods of participants of the investment process in the construction industry. **Methods** The research method was based on theoretical study, analytical generalisation and systematisation of normative and legislative bases, conceptual provisions and established practice of organising the interaction of participants in the investment process in construction. Systemic and situational approaches, statistical analysis and the method of graphic images were used in the research. **Results** The current legislative support of investment activity in construction was analytically generalised. The contemporary forms of organisational-economic interaction between the main participants in the sphere of investment relations in construction were investigated and features of their inclusion in the investment process were disclosed. A development form for the mechanism is proposed that allows the interests of all participants of the investment process in construction to be realised without harming the customer, contractor or investor, resulting in a synergetic effect. The functional role of the state in maintaining control over the implementation of investment projects in construction is stipulated. Effective forms and methods of implementing the organisational and economic mechanism for interaction between participants of the investment process in construction are disclosed, providing solutions to key issues in the investment and construction sectors, focused on the development and promotion of alternative options for investment and project solutions, the management of corporate resources and the organisation of financing investments in construction. **Conclusion** The systemic approach to the management of participants of the investment process in construction will make it possible to realise the needs of the investment-construction complex in highly effective forms of organisation and methods for implementing the investment projects. To overcome existing contradictions, characteristic for investment processes, it is necessary to develop and implement incentive measures that unite the interests of all participants in the construction process.

Keywords: investments, construction, participants, organisational and legal forms, interests, interaction

Введение. В настоящее время эффективная реализация инвестиционных проектов в строительстве во многом определяется и одновременно зависит от правильно выстроенной системы взаимоотношений между различными участниками инвестиционного процесса, обеспечивающих в своем взаимодействии решение инвестиционного замысла и задач.

Основными субъектами выступают инвесторы и пользователи объектов инвестирования [1]. Важную роль в инвестиционном процессе играют абсолютно все участники инвестиционного процесса.

Постановка задачи. Целью исследования является применение системного подхода к развитию организационных форм и методов управления взаимодействием участников инвестиционного процесса в строительстве.

Методы исследования. В строительстве как в специфическом виде производственно-хозяйственной деятельности реализуется множество инвестиционных проектов как промышленного, так и гражданского назначения. Разнообразны цели инвестирования в основной капитал (рис. 1) [2].

В инвестиционном процессе принимает участие значительное количество заинтересо-

ванных лиц [1-4].

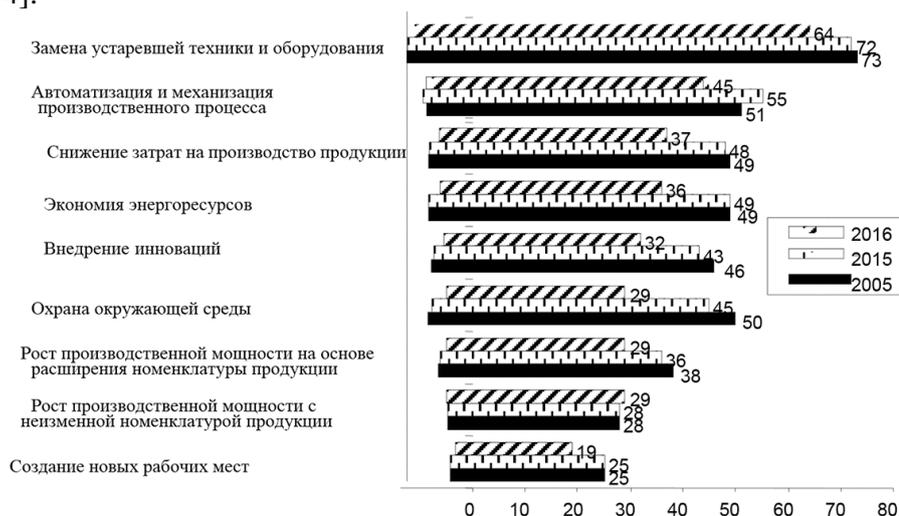


Рис.1. Ранжирование организаций в зависимости от целей инвестирования в основной капитал (в % от общего числа организаций)

Fig.1. Ranking of organizations depending on the purpose of investing in fixed assets (% of the total number of organizations)

В соответствии с Законом «Об инвестиционной деятельности в Российской Федерации, осуществляемой в форме капитальных вложений», участниками инвестиционной деятельности являются инвесторы, заказчики, подрядчики, пользователи объектов инвестиционной деятельности, другие лица [1]. Ими могут быть хозяйствующие субъекты, банковские и небанковские финансово-кредитные институты, посреднические организации, инвестиционные биржи, граждане, иностранные юридические и физические лица, государства и международные организации. Инвесторами могут являться вкладчики, покупатели, заказчики, кредиторы и другие участники инвестиционной деятельности [5].

В качестве основных участников инвестиционного процесса выступают организации, которые в соответствии с выполняемыми ими функциями именуется: инвестор, заказчик, застройщик, подрядчик и проектировщик.

Следует отметить, что инвестор является субъектом инвестиционной деятельности, осуществляющий финансирование строительства конкретного проекта. Он имеет юридические права на полное распоряжение результатами инвестиционного проекта.

Инвестор может выступать в роли заказчика, кредитора, покупателя, выполнять функции застройщика. В качестве вложений инвестор может использовать имущественные активы: денежные средства, депозитные вклады, акции, облигации, а также здания, машины, оборудование и нематериальные активы.

Заказчик – юридическое или физическое лицо, принявшее на себя функции организатора и управляющего по строительству, начиная от разработки технико-экономического обоснования до сдачи строительного объекта в эксплуатацию.

Застройщик – юридическое или физическое лицо, обладающее правами на земельный участок под застройку. Как правило, он является землевладельцем и может использовать земельный участок под застройку на правах аренды.

Подрядчик – строительная организация, осуществляющая по договору подряда строительство объекта, отвечающая перед заказчиком за строительство объекта в соответствии с условиями договора или проекта.

В качестве проектировщика могут выступать проектная или проектно-исследовательская организация, либо научно-исследовательский институт, осуществляющие по договору с заказчиком разработку проекта строительства.

Генеральный проектировщик несет полную ответственность за качество инвестиционного проекта, технико-экономические показатели объекта строительства, своевременность вы-

полнения договорных обязательств по реализации инвестиционных решений.

Для разработки отдельных разделов инвестиционного проекта допускается привлечение специализированных проектных или научно-исследовательских организаций.

Основной задачей инвестора и заказчика является сооружение объекта и ввод его в эксплуатацию при условии соблюдения бюджета инвестиционного проекта, минимизации капитальных вложений с целью получения дохода от ввода в эксплуатацию объекта.

Главной задачей подрядчика является обеспечение планируемой доходности инвестиционного проекта.

Интересы всех участников инвестиционной деятельности можно подразделить на следующие группы [5]:

1. Интересы инициаторов инвестиционного проекта – стратегическое развитие строительной организации, устойчивое позиционирование на рынке, получение прибыли.
2. Интересы инвесторов инвестиционного проекта – направлены на извлечение прибыли.
3. Интересы работников строительной организации: занятость, условия труда, материальное и моральное вознаграждение.

Следует подчеркнуть важность учета интересов всех участников еще на прединвестиционной стадии. Для этого необходимо разработать критерии значимости результатов инвестиционного процесса.

В общем виде такими критериями могут быть:

1. Удельный вес средств производства, привлекаемых на всех этапах жизненного цикла инвестиционного проекта.
2. Удельный вес финансовых ресурсов, привлекаемых в инвестиционный процесс.
3. Удельный вес персонала, вовлеченного в реализацию инвестиционного проекта.
4. Удельный вес нематериальных активов: деловая репутация организации, бренд, привлекаемых на всех этапах жизненного цикла инвестиционного проекта.
5. Наличие устойчивой клиентуры и портфеля заказов.

Обсуждение результатов. В традиционной схеме взаимодействия участников инвестиционного строительного проекта роли и функции участников процесса последовательны, четко разграничены, взаимно дополняют друг друга и представляют собой комплекс инвестиционных решений. Инвестор и застройщик формулируют цели инвестиционного проекта, заказчик, как правило, определяет последующих участников инвестиционного процесса - проектировщика и подрядчика.

Проектировщик разрабатывает объемно-планировочное и архитектурное решение инвестиционной идеи или замысла, подготовленных заказчиком, а также согласовывает его со всеми заинтересованными сторонами и контролирует его реализацию. Генподрядчик фактически реализует инвестиционные идеи, координирует работы многих исполнителей, взаимодействует и оказывает влияние на заказчика и проектировщика [8-11].

В современной практике строительства в зависимости от характера объекта, специфики требований заказчика и финансовых возможностей инвестора применяются различные схемы взаимодействия участников инвестиционного процесса.

Специфика форм взаимодействия участников инвестиционно-строительного процесса состоит в выявлении того обстоятельства, что на практике отсутствуют четкие границы и четкое разделение обязанностей между этими участниками (табл.1).

Поставщики обеспечивают объект строительными материалами и оборудованием. При этом каждый из участников может быть самостоятельным юридическим лицом, действующим как в своих интересах, так и в рамках правил строительной деятельности, обеспечивающие реализацию инвестиционного проекта.

Таблица 1. Характеристика основных функций и организационных форм участников инвестиционного процесса в строительстве*
Table 1. Characteristics of the main functions and organizational forms of participants in the investment process in construction*

Участники инвестиционного процесса	Функции в инвестиционном процессе	Субъекты
Инвесторы, заказчики	Финансирование инвестиций	Юридические и физические лица; органы исполнительной власти; институциональные инвесторы (пенсионные фонды, страховые компании т.д.)
Проектировщики	Разработка архитектурной, строительной, технологической и сметной документации	Научно-исследовательские организации; проектные организации
Производители материально-технических ресурсов	Производство строительных материалов, изделий и конструкций, а также строительных машин и механизмов, технологического, энергетического и другого оборудования	Строительные организации
Подрядчики	Производство строительно-монтажных работ; сдача в эксплуатацию строительного объекта	Организации различной формы собственности
Логистические компании	Формирование материалопотоков, комплектация, упаковка, доставка, складирование строительных материалов, изделий, конструкций и т.д.	Склады, оптовые базы, комплектующие организации, консалтинговые фирмы
Транспортные компании	Перевозка материально-технических ресурсов	Организации различных форм собственности

*Составлено автором по [9-13].

Так, традиционная организация строительства объекта предполагает организационное обособление участников инвестиционного процесса. При этом главными, активно действующими участниками, являются заказчик и генподрядчик, поскольку они организуют и контролируют процесс строительства в целом.

На практике, чаще всего преобладает комплексность и интегрированность функций субъектов инвестиционного процесса, отмечается совмещение функций инвестора-застройщика, или заказчика-генподрядчика, или даже инвестора-генподрядчика. В случае долевого строительства инвестор-дольщик, как правило, не участвует в управлении строительным процессом. Однако инвестор имеет право влиять на процесс строительства и даже контролировать его.

Застройщик, как правило, является собственником объекта, земельного участка или здания. В ходе реализации инвестиционного проекта застройщик реализует свой интерес по развитию объекта недвижимости. Он может и не обладать необходимыми для строительства инвестиционными ресурсами, привлекая их со стороны [12-13].

С учетом данных обстоятельств, возможны следующие варианты взаимодействия участников: застройщик-инвестор; застройщик-соинвестор и только застройщик.

Для любого инвестиционного проекта застройщик тесно связан с инвестором и степень их влияния на реализацию инвестиционного проекта может меняться от начальной до результирующей стадии, что зависит от многих причин.

Обычно в управлении строительным процессом застройщик не участвует и влияет на него незначительно. Заказчик - юридическое или физическое лицо, уполномоченное инвестором (или само являющееся инвестором) осуществлять реализацию инвестиционного процесса по строительству объектов.

Инвестор либо нанимает заказчика, либо функции заказчика обеспечивает служба инве-

стора или отдельные, специально назначенные представители (субинвесторы) инвестора. Заказчик является основным участником инвестиционно-строительного процесса. Он обеспечивает интересы инвестора и собственника объекта.

В тоже время, проектировщик занимает особое место во взаимоотношениях между инвестором и заказчиком.

Учитывая эти обстоятельства, можно предположить, что проектная организация является полноправным участником строительного этапа, а проектировщик - ключевое звено в системе обеспечения эффективной реализации инвестиционного проекта.

Проектировщик по требованию инвестора может принять на себя ряд функций заказчика, вплоть до полной его подмены на начальных стадиях проекта. Кроме того, на стадии строительства проектировщики выполняют и другие важные функции: они вносят исправления и изменения в утвержденную ранее проектную документацию, осуществляют авторский надзор.

Если из договора подряда не следует обязанность подрядчика выполнить предусмотренную в договоре работу лично, подрядчик вправе привлечь к исполнению обязательств других лиц (субподрядчиков). В этом случае подрядчик выступает в роли генерального подрядчика. Генеральный подрядчик несет перед заказчиком ответственность за последствия ненадлежащего исполнения обязательств субподрядчиком, а перед субподрядчиком несет ответственность за исполнение заказчиком обязательств по договору подряда. Заказчик и субподрядчик не вправе предъявлять друг другу требования, связанные с нарушением договоров, заключенных каждым из них с генеральным подрядчиком.

По согласованию с генеральным подрядчиком заказчик имеет право заключить договоры на выполнение отдельных работ с другими подрядчиками. В этом случае указанные подрядчики несут ответственность перед заказчиком. Генподрядчик на основе договора подряда на капитальное строительство заключает с субподрядчиком договор субподряда на выполнение отдельных видов и комплексов работ. Выполнение обязанностей заказчика по работам, на которые заключен договор субподряда, возлагается на генподрядчика, а обязанностей подрядчика — на субподрядчика.

Субподрядчик несет ответственность перед генподрядчиком за выполнение отдельных видов и комплексов работ в объемах и в сроки, определенные в договорах подряда.

Генподрядчик обязан обеспечить эксплуатационную готовность объекта, конструкций и отдельных видов работ для производства субподрядчиком комплекса работ; передать субподрядчику утвержденную проектно-сметную документацию в части выполняемых им работ; обеспечить финансирования работ; принять законченные виды работ, произвести оплату СМР; осуществить передачу субподрядчику оборудования, материалов и изделий, поставка которых возложена на генподрядчика; предоставить складские помещения и площадки; предоставить производственные, санитарно-бытовые и другие помещения; обеспечить субподрядчика энерго- и теплоресурсами; осуществлять охрану строительной площадки; координировать деятельность субподрядчиков; осуществлять контроль и технический надзор за соответствием выполняемых субподрядчиком работ рабочим чертежам и строительным нормам, государственным стандартам и ТУ; при выявлении отклонений выдавать предписание субподрядчику об устранении допущенных отклонений, а в необходимых случаях приостанавливать работы.

Субподрядчик обязан выполнять по договору субподряда отдельные виды и комплексы работ в установленные графиком производства монтажных и специальных строительных работ сроки согласно рабочим чертежам, в соответствии со строительными нормами и правилами; принять участие в сдаче комиссии законченных объектов и обеспечить совместно с генподрядчиком и заказчиком ввод их в эксплуатацию в установленные сроки.

Генподрядчик несет ответственность за сохранность сданных ему законченных субподрядчиком работ до сдачи объектов комиссии. Генподрядчик обязан совместно с привлекаемыми им субподрядчиками разработать и осуществить мероприятия, обеспечивающие безопасные условия работы на объектах строительства, обязательные для всех организаций, участвующих в строительстве.

Поставщики строительных материалов, конструкций и изделий обычно не рассматриваются как основные участники инвестиционно-строительного процесса. Однако следует отметить, что роль поставщиков при выполнении строительных работ в последнее время значительно выросла. Это связано с тенденцией сокращения площадей для хранения строительных материалов и оборудования; повышением требований к организации и условиям хранения строительных материалов и оборудования; закупками импортных материалов и оборудования, что приводит к необходимости выстраивания сложных логистических схем и соблюдение требований технических регламентов и стандартов [10 -11].

На этой основе становится возможным наилучшее обеспечение инвестиционной деятельности строительной организации с учетом основных направлений повышения эффективности управления инвестиционными проектами.

Наиболее часто применяются следующие схемы взаимодействия участников инвестиционно-строительных проектов:

1. Традиционная схема;
2. Схема «проектирование и строительство»;
3. Концессионная схема.

Перечисленные схемы базируются на различных вариантах генподрядного способа строительства объектов.

Традиционная схема взаимодействия участников инвестиционного процесса характеризуется тем, что строительные и проектные работы выполняются разными участниками инвестиционного процесса, при этом, как правило, проектные и строительные работы осуществляются последовательно.

Традиционная схема иногда называется схемой «проектирование-тендер-строительство», так как подрядные торги проводятся после завершения проектных работ. Главными преимуществами традиционного подхода являются:

- возможность достижения максимальной экономии средств инвестора;
- выполнение каждого вида работ специализированной организацией;
- последовательное качественное выполнение работ по проекту;
- равномерное распределение рисков между заказчиком и подрядчиком;
- контроль показателей и результатов работ на каждом этапе;
- возможность корректировки бюджета проекта.

Традиционная схема взаимодействия участников инвестиционно-строительного процесса показана на рис. 2.

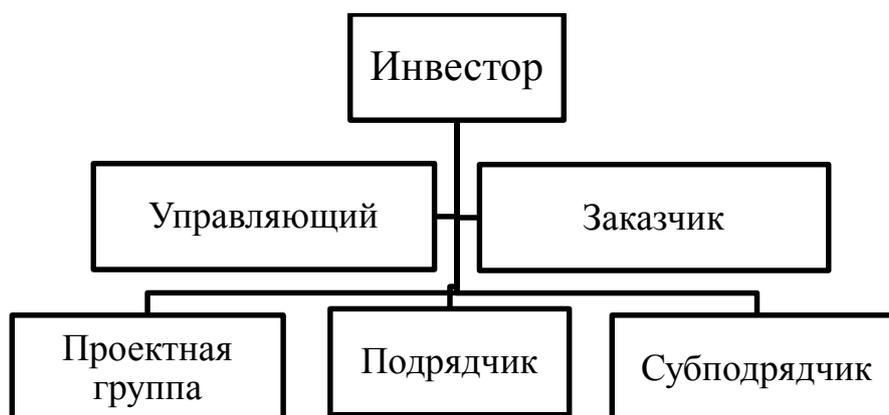


Рис.2. Традиционная схема взаимодействия участников инвестиционно-строительного процесса
Fig. 2. The traditional scheme of interaction of participants in the investment and construction process

При применении традиционного подхода к выполнению проекта строительная организация, принявшая решение участвовать в конкурсе на подрядные работы, получает в составе конкурсной документации проектную документацию, в том числе подробную смету объемов работ, что позволяет подрядчику достаточно точно рассчитать стоимость строительства.

Наряду с перечисленными достоинствами традиционная схема имеет ряд недостатков, а именно:

- более длительные, чем при применении других схем, сроки выполнения строительных проектов;
- значительная вероятность превышения фактической стоимости строительства над акцептованной;
- значительная вероятность продления установленного в договоре срока завершения работ;
- разрыв между проектированием и строительством.

Традиционный подход к реализации инвестиционных проектов в строительстве по-прежнему остается самым используемым в мировой практике строительства, однако в 80-х – 90-х годах прошлого века в США и Европе впервые отмечено снижение доли его использования до уровня чуть более 50% от всего количества выполняемых проектов [6]. Это означает, что заказчики чаще обращаются к нетрадиционным подходам взаимодействия при реализации инвестиционно-строительных проектов.

Для этого, в рамках традиционной схемы опытные заказчики ищут возможности достижения взаимодействия или частичной интеграции процессов проектирования и строительства, что позволяет уменьшить риски, связанные с разрывом между этими двумя видами деятельности в проекте.

При выполнении инвестиционного проекта по традиционной схеме заказчик оказывается в значительной степени вовлеченным в текущее планирование и выполнение проекта. Как правило, функции, связанные с планированием, составлением сметы затрат, подготовкой и проведением конкурсов, а также осуществлением надзора за строительством, делегируются заказчиком проектировщику, инженеру или профессиональным консультантом. Однако важнейшие контрольные функции в ходе строительства осуществляются заказчиком самостоятельно.

Традиционная схема организации инвестиционного процесса и взаимодействия участников проекта, как правило, используется в инвестиционных проектах следующего вида:

- в проектах строительства объектов транспортной инфраструктуры;
- в проектах по сооружению крупных промышленных объектов;
- в проектах строительства объектов для государственных нужд;
- в проектах, финансируемых международными финансовыми организациями.

В первых двух типах инвестиционных проектов традиционная схема является предпочтительной ввиду того, что она позволяет распределить риски между заказчиком и подрядчиком и обеспечить качественный технический и управленческий контроль над ходом строительных работ.

В двух последних видах инвестиционных проектов применение традиционной схемы позволяет обеспечить экономию бюджетных или заемных средств.

Вариантом традиционной схемы взаимодействия участников инвестиционного процесса является схема управленческо-строительного подряда [11-14]. Управленческо-строительный подряд предусматривает назначение подрядчика для выполнения двух функций – управляющего проектом и генерального подрядчика, при этом сам генеральный подрядчик строительных работ не выполняет.

Характеристика схемы [15]:

- генеральный подрядчик назначается на прединвестиционной стадии проекта и участвует в проектировании в качестве консультанта по строительству;
- все строительные работы ведутся строительными подрядчиками, привлеченными генеральным подрядчиком под его управлением;
- инвестиционные риски, связанные с выполнением работ подрядчиками, ложатся на генерального подрядчика;
- генеральный подрядчик получает фиксированную плату за управление инвестиционным проектом.

Схема «проектирование и строительство» предполагает передачу функций проектирования и строительства одному участнику инвестиционного процесса [16].

Наиболее часто применяющимися вариантами этой схемы являются: проектно-строительный подряд; выполнение работ на условиях «под ключ».

Проектно-строительный подряд широко применяется заказчиками, возводящими административные объекты, либо объектами, где строительные работы имеют меньшую сложность (торговые павильоны).

Применение указанного варианта схемы обеспечивает следующие преимущества: возможность параллельности выполнения работ и сокращение сроков выполнения инвестиционного проекта; уменьшение степени вовлеченности заказчика в управление инвестиционным проектом в части проектирования и строительства; уменьшение рисков заказчика.

К недостаткам данного варианта схемы можно отнести низкую возможность контроля инвестиционного процесса и результатов проектирования, а также более высокую общую стоимость объекта по сравнению со стоимостью такого же объекта, построенного традиционным методом. Это связано с тем, что подрядчик, взяв на себя риски проектирования объекта, стремится компенсировать их путем увеличения цены договора или проекта.

Одним из вариантов схемы «проектирование и строительство» является выполнение работ на условиях «под ключ». Проекты, выполняемые «под ключ» предоставляют подрядчику наибольшую свободу, но при этом подрядчик берет на себя большинство рисков, связанных с реализацией инвестиционного проекта [16 -18].

Схема «под ключ» характеризуется следующими особенностями: заказчик планирует приобрести готовый функционирующий объект; заказчик готов заплатить высокую цену за то, что срок ввода объекта и его цена останутся неизменными; строительство является лишь частью работ по контракту; риски, связанные с проектированием, строительством, вводом в эксплуатацию и выводением на проектную мощность возлагаются на подрядчика.

В качестве практического вывода из проведенного исследования необходимо рекомендовать при выборе схемы или модели взаимоотношений для конкретного инвестиционного проекта применять концессионную модель и методы управления рисками. Именно поэтому заказчик должен понимать, что чем больше полномочий он передает подрядчику, тем меньше рисков несет сам заказчик, но тем дороже обойдется ему строительство объекта.

Вывод. Выход из экономического кризиса в строительной отрасли невозможен без создания условий для активизации инвестиционного процесса, охватывающего все большее число участников. Деятельность каждого из них направлена на удовлетворение собственного интереса, побуждающего к участию в инвестиционном процессе.

Различные схемы взаимодействия участников инвестиционного процесса предусматривают разное распределение ответственности между заказчиком и подрядчиком, а значит и разное распределение рисков инвестиционного проекта.

Наибольшая ответственность, как правило, возлагается на подрядчика при реализации схемы, в которой подрядчик не только проектирует и строит объект, но является его соинвестором, а также осуществляет эксплуатацию построенного объекта в пределах установленного в инвестиционном договоре срока.

Библиографический список:

1. Федеральный закон от 25.02.1999 № 39-ФЗ (ред. от 28.12.2013) «Об инвестиционной деятельности в Российской Федерации, осуществляемой в форме капитальных вложений» // Собрание законодательства РФ. - 01.03.1999. - № 9. - ст. 1096.
2. Инвестиции в России -2017 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://nangs.org/analytics/rosstat-investitsii-v-rossii-s-prilozheniyami-onlajn-pdf-rar> свободный.
3. Беломестнов В.Г. Управление инвестиционными процессами / В.Г. Беломестнов. – Улан-Удэ: Издательство ВСГТУ, 2009. – 172 с.
4. Насрулла Адамов, Вячеслав Зимин и Алексей Кеменов Инвестиционные процессы в строительстве; LAP Lambert Academic Publishing - М., 2014. - 248 с.
5. Daniel Kaufmann. Click Refresh Button: Investment Climate Reconsidered // Development Outreach. Volume seven. Number one. March. 2005. p. 16-19

6. Esetova A.M., Pavliuchenko E.I., Ismailova Ch.T., Levitsky T.Y. System Restructuring as a Factor of Increasing Management Efficiency in Construction// *Indian Journal of Science and Technology*, Vol 8(s10), DOI: 10.17485/ijst/2015/v8iS10/IPL0810, December 2015, pp.247-255.
7. Raj M. Desai and Sanjay Pradham. Governing the Investment Climate // *Development Outreach*. Volume seven. Number one. March. 2005. p.13-16.
8. Warrick P. Smith and Mary C. Hallward-Driemeier. A Better Investment Climate for Everyone // *Development Outreach*. Volume seven. Number one. March. 2005. p.2-7.
9. Беляков А.А., Туруев И.Б. Государство и инвестиции // *Экономический анализ: теория и практика*. - 2015. - № 7. - С. 2 - 8.
10. Борисова О.В. Инвестиционный климат в России: состояние и оценка // *Аудит и финансовый анализ*. - 2015. - № 1. - С. 288 - 295.
11. Васильев В.Л. Управление инвестициями в предпринимательстве и экономике страны // *Страховое дело*. - 2014. - № 10/11. - С. 3 - 8.
12. Зубрилин Е.В. Результативность отношений государственно-частного партнерства // *Вопросы экономики и права*. - 2014. - № 8. - С. 75 - 79.
13. Красильников С. Альтернативные инвестиции в условиях холдинга // *Проблемы теории и практики управления*. - 2015. - № 4. - С. 35 - 43.
14. Леонтьев В.Е., Бочаров В.В., Радковская Н.П. Инвестиции. - М.: Юрайт, 2014. - 456 с.
15. Федотовский А.Ю. Разработка метода оценки экономической эффективности инновационного проектного управления в строительной отрасли// *Проблемы современной экономики*. – 2009. –№ 1. - С. 5.
16. Москвитина Е.И., Дорошина И.П., Бутова Т.В. Необходимость модернизации государственного регулирования инвестиционной деятельности в России в условиях глобальной конкуренции // *Теоретические и прикладные аспекты современной науки*. - 2015. - № 6. - С. 113 - 115.
17. Теплова Т.В. Инвестиции. Теория и практика. - М.: Юрайт, 2014. - 782 с.
18. Шулуc А., Шулуc В. Совершенствование управления инвестиционной деятельностью и индикативное его регулирование // *Инвестиции в России*. - 2013. - № 5. - С. 15 - 20.

References:

1. Federal'nyi zakon ot 25.02.1999 № 39-FZ (red. ot 28.12.2013) "Ob investitsionnoi deyatelnosti v Rossiiskoi Federatsii, osushchestvlyаемой в форме kapital'nykh vlozhenii". *Sobranie zakonodatel'stva RF*. 01.03.1999. № 9. st. 1096. [Federal Law No. 39-FZ of February 25, 1999 (as amended on December 28, 2013) "On investment activity in the Russian Federation, carried out in the form of capital investments". Collection of legislation of the Russian Federation. 01.03.1999. № 9. art. 1096. (in Russ.)]
2. Investments in Russia -2017 [Elektronnyi resurs]. Rezhim dostupa: : <https://nangs.org/analytics/rosstat-investitsii-v-rossii-s-prilozheniyami-onlajn-pdf-rar> [Investments in Russia -2017 [Electronic resource]. Available at: : <https://nangs.org/analytics/rosstat-investitsii-v-rossii-s-prilozheniyami-onlajn-pdf-rar>. (in Russ.)]
3. Belomestnov V.G. Upravlenie investitsionnymi protsessami. Ulan-Ude: Izdatel'stvo VSGTU; 2009. 172 s. [Belomestnov V.G. Management of investment processes. Ulan-Ude: Izdatel'stvo VSGTU; 2009. 172 p. (in Russ.)]
4. Adamov N., Zimin V., Kemenov A. Investitsionnye protsessy v stroitel'stve. M.: LAP Lambert Academic Publishing; 2014. 248 s. [Adamov N., Zimin V., Kemenov A. Investment processes in construction. M.: LAP Lambert Academic Publishing; 2014. 248 p. (in Russ.)]
5. Kaufmann D. Click refresh button: Investment climate reconsidered. *Development Outreach*. 2005;7(1):16-19.
6. Esetova A.M., Pavliuchenko E.I., Ismailova Ch.T., Levitsky T.Y. System restructuring as a factor of increasing management efficiency in construction. *Indian Journal of Science and Technology*. 2015;8(s10):247-255. DOI: 10.17485/ijst/2015/v8iS10/IPL0810.
7. Desai R.M., Pradham S. Governing the investment climate. *Development Outreach*. 2005;7(1):13-16.
8. Smith W. P., Hallward-Driemeier M. S. A better investment climate for everyone. *Development Outreach*. 2005;7(1):2-7.
9. Belyakov A.A., Turuev I.B. Gosudarstvo i investitsii. *Ekonomicheskii analiz: teoriya i praktika*. 2015;7:2-8. [Belyakov A.A., Turuev I.B. State and investment. *Economic Analysis: Theory and Practice*. 2015;7:2-8. (in Russ.)]
10. Borisova O.V. Investitsionnyi klimat v Rossii: sostoyanie i otsenka. *Audit i finansovyi analiz*. 2015;1:288 - 295. [Borisova O.V. Investment climate in Russia: state and assessment. *Audit i finansovyi analiz*. 2015;1:288 - 295. (in Russ.)]
11. Vasil'ev V.L. Upravlenie investitsiyami v predprinimatel'stve i ekonomike strany. *Strakhovoe delo*. 2014;10/11:3-8. [Vasil'ev V.L. Management of investments in business and economy of the country. *Strakhovoe delo*. 2014;10/11:3-8. (in Russ.)]
12. Zubrilin E.V. Rezul'tativnost' otnoshenii gosudarstvenno-chastnogo partnerstva. *Voprosy ekonomiki i prava*. 2014;8:75-79. [Zubrilin E.V. Effectiveness of public-private partnership relations. *Economic and Law Issues*. 2014;8:75-79. (in Russ.)]

13. Krasil'nikov S. Al'ternativnye investitsii v usloviyakh kholdinga. Problemy teorii i praktiki upravleniya. 2015;4:35-43. [Krasil'nikov S. Alternative investments in the conditions of holding. Theoretical and Practical Aspects of Management. 2015;4:35-43. (in Russ.)]
14. Leont'ev V.E., Bocharov V.V., Radkovskaya N.P. Investitsii. M.: Yurait; 2014. 456 s. [Leont'ev V.E., Bocharov V.V., Radkovskaya N.P. Investments. M.: Yurait; 2014. 456 p. (in Russ.)]
15. Fedotovskii A.Yu. Razrabotka metoda otsenki ekonomicheskoi effektivnosti innovatsionnogo proektnogo upravleniya v stroitel'noi otrasli. Problemy sovremennoi ekonomiki. 2009;1:5. [Fedotovskii A.Yu. Development of a method for assessing the economic efficiency of innovative project management in the construction industry. Problems of modern economics. 2009;1:5. (in Russ.)]
16. Moskvitina E.I., Doroshina I.P., Butova T.V. Neobkhodimost' modernizatsii gosudarstvennogo regulirovaniya investitsionnoi deyatel'nosti v Rossii v usloviyakh global'noi konkurentsii. Teoreticheskie i prikladnye aspekty sovremennoi nauki. 2015;6:113-115. [Moskvitina E.I., Doroshina I.P., Butova T.V. Necessity of modernisation of state regulation of investment activity in Russia in the conditions of global competition. Teoreticheskie i prikladnye aspekty sovremennoi nauki. 2015;6:113-115. (in Russ.)]
17. Teplova T.V. Investitsii. Teoriya i praktika. M.: Yurait; 2014. 782 s. [Teplova T.V. Investments. Theory and practice. M.: Yurait; 2014. 782 p. (in Russ.)]
18. Shulus A., Shulus V. Sovershenstvovanie upravleniya investitsionnoi deyatel'nost'yu i indikativnoe ego regulirovanie. Investitsii v Rossii. 2013;5:15-20. [Shulus A., Shulus V. Improving the management of investment activities and its indicative regulation. Investitsii v Rossii. 2013;5:15-20. (in Russ.)]

Сведения об авторах:

Магомедов Магомед Гимбатгаджиевич – соискатель.

Павлюченко Елена Ивановна - доктор экономических наук, профессор.

Information about the authors:

Magomed G. Magomedov – Aspirant.

Elena I. Pavlyuchenko – Dr.Sci. (Economics), Prof., Member of the editorial Board.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 02.04.2018.

Принята в печать 24.06.2018.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 02.04.2018.

Accepted for publication 24.06.2018.

Для цитирования: Оборин М.С. Антикризисное управление промышленным производством регионов России в условиях санкций. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2018; 45 (2): 220-231. DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-2-220-231

For citation: Oborin M.S. Anti-crisis management of the Russia's regional industrial production under the conditions of sanctions. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2018; 45 (2): 220-231. (in Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-2-220-231

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 338.48

DOI: 10.21822/2073-6185-2018-45-2-220-231

АНТИКРИЗИСНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОМЫШЛЕННЫМ ПРОИЗВОДСТВОМ РЕГИОНОВ РОССИИ В УСЛОВИЯХ САНКЦИЙ

Оборин М.С.

Пермский институт (филиал) ФГБОУ ВО «Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова»,

614070, г. Пермь, ул. Бульвар Гагарина, 57, Россия,

Пермский государственный национальный исследовательский университет,

614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15, Россия,

Пермский государственный аграрно-технологический университет им. ак. Д.Н. Прянишникова,

614990, г. Пермь, ул. Петропавловская, д. 23, Россия,

Сочинский государственный университет,

354000, г. Сочи, ул. Советская, 26-а, Россия,

e-mail: matvey_uk@rambler.ru

Резюме: **Цель.** Целью исследования является выявление направлений развития промышленного производства регионов страны в условиях продолжающегося санкционного давления. **Методы.** Методами исследования являются системный и ситуационный подходы, моделирование экономических процессов и явлений. В целях наглядного изображения аналитических данных и авторских результатов использован метод графических изображений. **Результат.** Рассмотрены особенности развития промышленного производства регионов страны, в частности Приволжского федерального округа и Пермского края, выявлены общие положительные тенденции, связанные с объемом производства, а также снижение цен и объемов производства в металлургии, обусловленное санкциями и неблагоприятной внешней конъюнктурой рынка. Металлургическое производство в России развивается разнонаправленно, поскольку на некоторые виды продукции спрос повышается, но на отдельные виды действуют ограничения, в связи с чем, возникает необходимость в разработке компенсаторных механизмов на основе государственного регулирования ценовой политики и сбыта. Несмотря на санкционное давление, экспорт продукции рассматриваемой отрасли увеличивается, однако нестабильность мировых цен влияет на дестабилизацию предприятий-экспортеров. Обоснованы меры комплексной поддержки государства, которые заключаются в формировании антикризисного механизма управления на основе подходов, которые положительно себя зарекомендовали в отраслях, испытывающих проблемы мировой рыночной конъюнктуры. **Вывод.** С учетом проведенного анализа был предложен механизм антикризисного управления в металлургической отрасли, который может быть адаптирован к региональным и отраслевым особенностям действующих промышленных предприятий.

Ключевые слова: промышленное производство, металлургическая промышленность, санкционное давление, экспорт, объем производства, антикризисный механизм

ECONOMIC SCIENCE

ANTI-CRISIS MANAGEMENT OF THE RUSSIA'S REGIONAL INDUSTRIAL PRODUCTION UNDER THE CONDITIONS OF SANCTIONS

Matvey S. Oborin

Perm Institute (branch) of Plekhanov Russian University of Economics,
57 Gagarina bulvar, Perm 614070, Russia,
Perm State University,
15 Bukireva Str., Perm 614990, Russia,
D.N. Pryanishnikov Perm State Agro-Technological University,
23 Petropavlovskaya Str., Perm, 614990, Russia,
Sochi State University,
26a Sovetskaya Str., Sochi 354000, Russia,
e-mail: matvey_uk@rambler.ru

Abstract Objectives The aim of the study is to identify the development directions for industrial production in the regions of the Russian Federation under the conditions of ongoing sanction pressure. **Methods** Systemic and situational approaches, as well as the modelling of economic processes and phenomena, are used as research methods. The graphic images method is used in order to visualise the analytical data and the results. **Results** The development features of industrial production in the country's regions are examined; in particular, those of the Volga Federal District and the Perm Krai. Generally positive trends associated with production volumes – as well as a slight decrease in prices and production volumes in metallurgy caused by sanctions and unfavourable external market conditions – are revealed. Due to increased demand for certain types of products, Metallurgical production in Russia is developing in different directions; however, as a consequence of restrictions imposed on some of them, there is a need to develop compensatory mechanisms based on state regulation of pricing and sales policies. Despite the sanctions, export of the products of the industry under review is increasing; nevertheless, the stability of exporting enterprises is affected by volatility in world prices. The relevance of state complex support measures is substantiated; these consist in the formation of an anti-crisis management mechanism based on approaches that have been proven in industries experiencing problems of the world market situation. **Conclusion** Taking into account the performed analysis, an anti-crisis management mechanism in the metallurgical sector, which can be adapted to the regional and branch features of operating industrial enterprises, was proposed.

Keywords: industrial production, metallurgical industry, sanction pressure, export, production volume, anti-crisis mechanism

Введение. Промышленность представляет основную отрасль материального производства, являющуюся системообразующей для многих сфер жизнедеятельности и экономики страны, связующий элемент между передовыми достижениями оборонной сферы и их внедрением в различные виды экономической деятельности для повышения качества жизни населения. Проблемы устойчивости промышленного сектора являются одними из основных, так как рассматриваемый вид деятельности в наибольшей степени уязвим и зависим от макроэкономических тенденций и геополитических кризисов, которые в настоящее время усиливаются и характеризуются длительным негативным воздействием на регионы и национальные хозяйства.

В отечественной науке можно выделить ряд направлений, которые рассматриваются учеными: влияние санкций на промышленный сектор страны и регионов и разработка антикризисных мер; реструктуризация промышленного производства в субъектах страны на основе прогрессивных инновационных и цифровых технологий; формирование промышленных кластеров и технопарков, которые способны обеспечить синергетический эффект и прорыв экономического роста территорий; внедрение моделей импортозамещения. Рассмотрим некоторые из

них. Влияние кризисных явлений, санкций и вступление в ВТО на различные отрасли промышленного производства изучались В.А. Черешневым; А.И. Татаркиным; В.И. Тарасовым; В.И. Куриловым; И.И. Маламедовым.

Развитие легкой промышленности и перспектив повышения эффективности отрасли исследовались И.Г. Йоффе; Т.Б. Матвеевой; К.М. Пироговым; Т.Б. Поляк; А.П. Жихаревым; Г.Д.Красильниковым; А.А. Урасовой. В частности, в работах Г.Д. Красильникова, А.А. Урасовой [4] состояние промышленности Пермского края рассматривается через призму санкционных ограничений и влияния фактора ВТО, оценки рисков. В результате предложены концептуальные основы формирования региональной политики на основе сравнения показателей промышленного роста с другими субъектами Приволжского федерального округа, разработаны принципы взаимодействия с отраслевыми и региональными субъектами. Санкции оцениваются положительно с точки зрения развития внутреннего предложения и наращивания мощности.

Основной акцент сделан на проектное финансирование и развитие частно-государственного партнерства, субсидирования интеллектуальной собственности в отрасли, влияние внешних негативных факторов – санкций, кризисных явлений, ухудшающих платежеспособность [1,16]. Обращено внимание на формирование региональной институциональной среды: законодательство, инфраструктура, налоговый и инвестиционный климат, адаптация государственных стратегических установок к особенностям территорий.

А.Н. Пыткин, А.А. Урасова [14] рассматривают проблемы формирования регионального рынка металлургической продукции с учетом анализа факторов риска и вступления в ВТО, в основе политики субъекта должны быть обеспечение инвестиционной привлекательности и рыночного ценообразования. Авторами отмечены такие негативные факторы, как антидемпинговые меры, способствующие убыточности отраслевых предприятий, технологическая отсталость производства и низкий уровень внутреннего потребления.

Снижение импортных пошлин в результате применения условий ВТО привели к значительному росту межрегиональной конкуренции, дополнительному снижению объемов реализации вплоть до 500 млн. долл. ежегодно. Сокращение деловых связей также усугубили положение отрасли в Приволжском федеральном округе и Пермском крае. Предлагается развитие отрасли в рамках партнерства с крупнейшими налогоплательщиками Пермского края, что повысит уровень продаж, обеспечит формирование стратегического альянса с соседними регионами, в которых металлургическая промышленность развита в меньшей степени, либо отсутствует материально-сырьевая база.

Отдельная группа трудов посвящена инновациям в промышленности. Например, Е.Е. Гилязова, В.Н. Кобелев, И.В. Макарова [3] отмечают, что устойчивый рост индустриально развитых регионов зависит от системного обеспечения инновационного процесса как основного фактора развития. К таким условиям относятся: высокий инвестиционный потенциал; благоприятные экономические и институциональные условия; развитая инновационная инфраструктура. По мнению Ю.А. Малышева, А.И. Камалова [7], развитие всех сфер государства основывается на эффективных инвестициях и промышленном росте.

Большой пласт научных работ в области эффективности промышленного производства связан с кластерами. В трудах отечественных и зарубежных ученых прослеживается два основных направления. Первое связано с оценкой внешних эффектов от кластерной формы организации производства, в большей степени внимание акцентировалось на территориальном развитии, социально-экономических эффектах: в трудах М. Вебера, А. Леша, А. Смита, Д. Риккардо, Э. Хекшера и Б. Олина, Ф. Листа, С. Коэна, У. Изарда, Й. Шумпетера, Н.Н. Баранского, Н.Н. Колосовского и др. Второе направление было сосредоточено на исследовании внутренних экономических эффектов для предприятий, входящих в состав кластера. Оно представлено работами М. Энрайта, С. Розенфельда, П. Потье, Е. Варги, М. Максимовой, Ю. Шишкова, М. Войнаренко, С. Соколенко, С. Раевского, А.Г. Гранберга, в них обосновывались преимущества экономических агентов, представляющих ядро промышленного кластера.

В зарубежной литературе под кластером понимается группа географических соседству-

ющих взаимосвязанных компаний и связанных с ними организаций, действующих в определенной сфере и характеризующихся общностью деятельности и взаимодополняющих друг друга (М. Портер [13]); индивидуальный комплекс, сформированный на базе территориальной концентрации сетей специализированных поставщиков, основных производителей, связанных технологической цепочкой и выступающих альтернативой секторальному подходу (Д. Хааг [17]).

Отечественная школа под промышленным кластером подразумевает территориальное объединение взаимосвязанных предприятий и учреждений в пределах промышленного района, основные факторы: близость к рынкам, специализированная рабочая сила, низкие издержки, экономия от масштаба, доступ к ресурсам (С.И. Соколенко [15]); объединение регионов с похожим социально-экономическим положением (В.М. Кутын [5]); упорядоченная совокупность специализированных предприятий, выпускающих конкурентоспособную продукцию (А.С. Воронов [2]); образующиеся внутри фирмы группы, куда входят работники различных профессиональных профилей, работающие вместе на постоянной основе (Б.Н. Никонов [6]).

Можно сделать вывод, что приоритетными направлениями исследований промышленного развития России являются в первую очередь региональные производственные системы и кластеры; эффективность промышленной политики, формирование ее финансовых, нормативно-правовых и институциональных основ.

Постановка задачи. Развитие промышленности в регионах России должно основываться на сложившейся структуре производства, финансово-экономических связях с другими территориями и странами, являющихся торговыми партнерами. Нестабильность мировых цен и санкционное давление являются основными факторами риска, в связи с этим необходим антикризисный механизм управления, учитывающий направления развития промышленного производства. Особую актуальность антикризисное регулирование приобретает в металлургической промышленности, которая несмотря на рост экспорта по отдельным товарным группам, продолжает испытывать проблемы. Возникает потребность в модели антикризисного механизма, который может быть адаптирован с учетом отраслевой и региональной специфики для снижения негативного воздействия глобальных факторов.

Методы исследования. Системный подход позволяет оценивать промышленность, отрасль металлургического производства как часть сложного социально-экономического механизма, влияющего на внутренние и внешние торгово-экономические отношения, и устойчивый рост взаимосвязанных отраслей, рынка труда, показателей качества жизни населения вследствие роста доходности лидирующих предприятий, расположенных на определенной территории. Ситуационный подход учитывает различные условия и факторы отраслевого развития, действующие в настоящий период и определяющие состояние отрасли и тенденции ее формирования, которые носят краткосрочный и среднесрочный характер. Моделирование позволяет наглядно осуществлять перспективное видение решений проблемных ситуаций, связанных с антикризисным управлением отраслью металлургии.

Обсуждение результатов. Целесообразно рассмотреть перспективы развития тех отраслей промышленного производства, которые испытывают сильное воздействие санкций. В первую очередь, это металлургическая промышленность. Рассматриваемый вид производства для России является одним из приоритетных. Металлургическая промышленность, являясь поставщиком для более сложных видов наукоемких производств, оказывает особое влияние на существование и развитие других видов хозяйственной деятельности. На сегодняшний день Россия находится в первой пятерке стран, производящих сталь и экспортирующих стальную продукцию, а в сфере цветной металлургии осуществляет контроль над другими производствами. Россия находится на лидирующих позициях по показателям мировой торговли алюминием, никелем, черных металлов и так далее. В ее сфере влияния входит около 20% всего производства алюминия в мире, 40% никелевых производств, большая часть рынка меди и платиноидов. Важное значение имеют цветная и черная металлургия в определении уровня национальной безопасности и обороноспособности страны, отрасль военной промышленности не может су-

ществовать отдельно от металлургической. В этом направлении наблюдается слияние больших потоков инвестиционных и финансовых средств, осуществляются инновационные технологические разработки, развивается научно-техническое оснащение. Во многих городах России металлургическая промышленность является главной отраслью: многие предприятия данной сферы хозяйственной деятельности формируют комплекс градообразующего значения. Металлургия является второй после энергетической (нефть, газ) отраслью российской экономики. В то же время, энергетическая сфера и металлургическая промышленность зависят друг от друга.

Несмотря на неблагоприятный внешний фон и геополитические сложности, сегодня металлургическая промышленность в России является динамично развивающейся структурой, гибкость и адаптивность которой постоянно растет по отношению к факторам влияния различного порядка. Она представляет собой конкретное научное и техническое направление, производственный процесс, в основе которого добыча металлов из рудников, других видов сырья, а также изменение структуры, химического состава и свойств сплавов металла, производство различной продукции.

По данным Министерства промышленности и торговли, Россия находится на 2 месте следом за Китаем по производству стальных труб, 3 место после Китая и Японии по экспорту металлопродукции, 5 место по производству товарной железной руды – после Китая, Австралии, Бразилии и Индии. Согласно прогнозам Министерства экономического развития России, основной прирост мирового потребления продукции металлургии будет происходить за счет Индии (+43 млн тонн), Бразилии (+25 млн тонн), а также незначительно этот показатель увеличится по России, Японии, Южной Кореи, США.

Отрасль черной металлургии России представлена десятком крупнейших компаний и корпоративных групп, на чью долю приходится более 80% всего среднегодового выпуска металлопроката и 75% стальных труб, к ведущим производителям относятся ООО «ЕВРАЗ», ПАО «Новолипецкий металлургический комбинат», АО «Холдинговая компания «Металлоинвест», ПАО «Трубная металлургическая компания», ПАО «Северсталь».

Состояние производства металлургической промышленности в процентном соотношении к общему объему рынка представлено в табл. 1.

Таблица 1. Производство главных видов продукции металлургии в 2014-2016гг., %*
Table 1. Production of the main types of metallurgy products in 2014-2016., %*

Вид продукции	2014	2015	2016	Темп роста, %	Темп прироста, %
Чугун	51,5	52,4	51,9	100,8	0,8
Сталь	70,5	69,4	69,8	99,0	-1,0
Прокат готовый (черный металл)	61,2	60,4	60,5	98,9	-1,1
Прокат плоский с покрытиями	5,6	5,5	5,3	94,6	-5,4
Трубы стальные	11,3	11,4	10,4	92,0	-8,0

*Составлено по данным [8-12]

Как видно из таблицы 1, в целом по России уровень использования среднегодовой производственной мощности предприятий по реализации металлургической продукции по многим видам за последние несколько лет доступных данных незначительно снизился на несколько процентов. Наибольшую долю рынка по-прежнему занимает сталь (69,8% по состоянию на 2016 год), далее следует прокат черного металла (60,5%), замыкает тройку лидеров чугун (51,9%).

Следующий показатель состояния металлургического производства в России – это темпы роста (снижения) производства основных видов цветных металлов, который представлен в табл. 2.

Таблица 2. Темпы роста (уменьшения) производства основных видов цветных металлов в 2014-2016 гг., %*

Table 2. Growth rates (decrease) of production of the main types of non-ferrous metals in 2014-2016., %*

Вид продукции	2014	2015	2016	Темп роста, %	Темп прироста, %
Цинк необработанный нелегированный	102,8	87,2	107,2	104,3	4,3
Медь рафинированная нелегированная необработанная	101,8	98,1	100,8	99,0	-1,0
Свинец необработанный	95,8	95,5	92,3	96,3	-3,7
Алюминий необработанный	94,1	95,5	92,3	98,1	-1,9
Никель необработанный	98,2	95,1	82,9	84,4	-15,6

*Составлено по данным [8-12]

По данным Федеральной службы государственной статистики в 2015 году в связи с введенными по отношению к нашей стране санкциями наблюдалось резкое снижение темпов роста производства необработанного цинка (-15,6%). В 2016 году ситуация стабилизировалась – рост составил 7,2%. Стабильными показателями отличается производство меди, свинца и алюминия; никель в 2016 году просел на несколько позиций.

Проанализируем динамику экспорта по отдельным группам продукции металлургической промышленности (рис. 1).

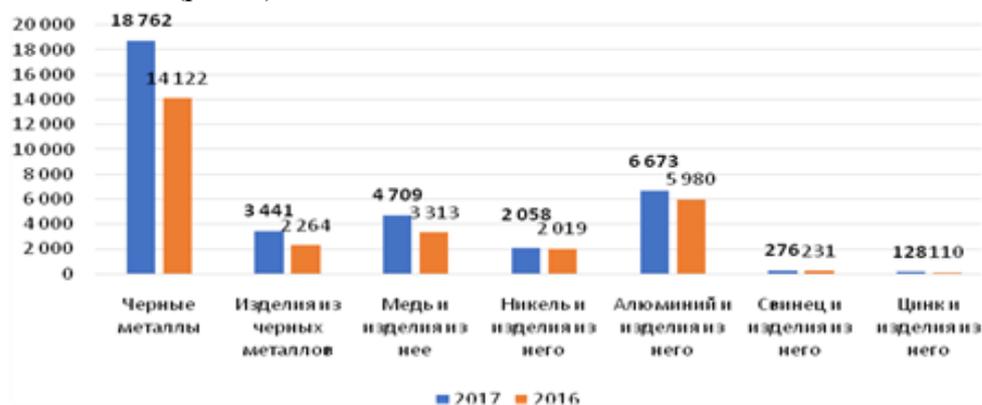


Рис. 1. Динамика экспорта отдельных групп продукции металлургической промышленности в 2016-2017 гг., млн. долл. (составлено по данным [10])

Fig. 1. Dynamics of exports of certain groups of products of the metallurgical industry in 2016-2017, mln. (compiled from [10])

Несмотря на сокращение производства, экспорт за 2017 год значительно вырос, составив прирост на 32,8% (черные металлы); 52% (изделия из черных металлов); 42,1% (медь и изделия из нее); 19,3% (свинец и изделия из него). Более детально анализ состояния металлургической промышленности рассмотрим на примере Приволжского федерального округа и Пермского края. Пермский край – это экспортно-ориентированный регион с долей экспорта 88% от объема внешнего товарооборота. Крупнейшими торговыми странами-партнерами при экспорте являются Бразилия (13%), Нидерланды (12,5%), Китай (8,8%), Бельгия (5,6%), Индия (5,4%), США (5,3%). В товарной структуре экспорта Пермского края преобладает продукция химической промышленности, составляющая 60,8% от общего объема экспорта, минеральные продукты составляют 25,4%, древесина и целлюлозно-бумажные изделия – 7,0%. В числе основных экспортеров такие предприятия, как: ПАО «Уралкалий», АО «Минеральные удобрения», ПАО «Мегафракс», АО «Соликамскбумпром».

По абсолютному размеру валового регионального продукта (ВРП), как и по ВРП на душу населения, Пермский край занимает лидирующие позиции в ПФО (ВРП на душу населения

в 2015 г. составил 397,6 тыс. руб., 2 место), и входит в число 20 крупнейших регионов РФ. Доля ВРП края в ВВП России по итогам 2015 года составила – 1,61% (в 2014 г.-1,65%). Самые крупные доли в ВРП занимают обрабатывающие производства 30,7% ВРП [1]. По показателям темпа роста и прироста, производство ВРП в Пермском крае положительно и прогрессирует (табл. 3).

Таблица 3. Динамика ВРП в Пермском крае в 2010-2015 гг., млн. руб.*
Table 3. Dynamics of GRP in the Perm region in 2010-2015, mln. rub. *

Показатель	2010	2011	2012	2013	2014	2015	Темп роста, %	Темп прироста, %
Выпуск продукции, млн. руб.	1362	1772	1871	1995	2144	2289	1,06	0,06
Промежуточное потребление, млн. руб.	739	932	1011	1115	1169	1241	1,06	0,06
ВРП в основных ценах, млн. руб.	623	840	860	880	974	1048	1,07	0,07
ВРП на душу населения, в основных ценах, руб.	235	319	326	334	369	397	1,07	0,07
Валовое накопление основного капитала, млн. руб.	140	145	163	226	214	240	1,11	0,11

* Составлено по данным [9]

Самые крупные доли в ВРП занимают обрабатывающие производства, в общей сложности они составляют 30,7% ВРП [8]. Индекс промышленного производства Пермского края показывает более высокий рост, чем по России и Приволжскому федеральному округу (рис. 2).

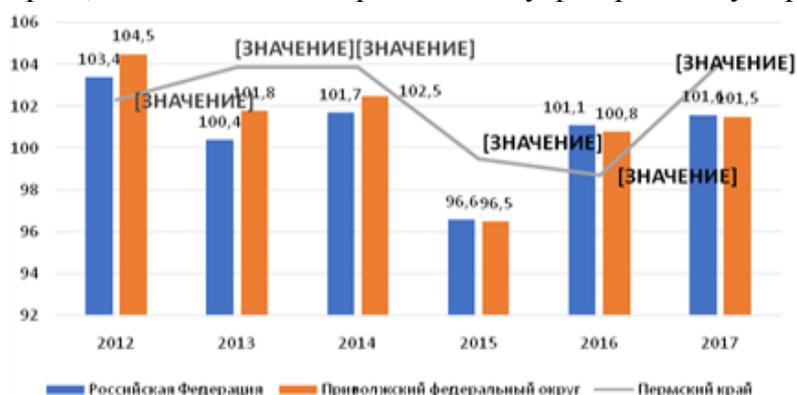


Рис.2. Индекс промышленного производства Пермского края в сравнении с Россией и Приволжским федеральным округом за 2012-2017 гг., % (составлено по данным [10])

Fig. 2. Industrial production index of the Perm region in comparison with Russia and the Volga Federal district for 2012-2017, % (based on data [10])

На территории Пермского края в рамках диверсификации производства некоторые крупные предприятия региона создают проекты с целью По данным на 2017 год в Пермском крае насчитывается около 81443 предприятия.

Металлургическая промышленность Приволжья не является градообразующей для региона. Однако важными направлениями отрасли могут быть отмечены трубная промышленность, производство медной и алюминиевой продукции. К примеру, Кировский завод по обработке цветных металлов занимает j часть всего российского рынка проката из меди и медных сплавов. Также стоит отметить Выксунский металлургический завод, расположенный в Нижегородской области, Самарский металлургический завод, который осуществляет производство полу-

фабрикатов из сплавов алюминия, и завод «Русполимет», выпускающий 90% всей продукции на внутреннем рынке для аэрокосмической отрасли [4].

Доля общего объема выпуска металлургической промышленности Приволжского федерального округа и лидирующих регионов отражены на рис. 3.



Рис. 3. Объем выпуска металлургической промышленности Приволжского федерального округа и лидирующих регионов в 2017 г., % (составлено по данным [10])

Fig. 3. The volume of output of the metallurgical industry of the Volga Federal district and the leading regions in 2017, % (compiled from [10])

Удельный вес металлургического производства и производства готовых металлических изделий Приволжского ФО в российском рынке составляет 11,2%. В общем по данному показателю в округе лидирует Оренбургская область – на нее приходится около 50% всего производства металлургической продукции, на втором месте идет Нижегородская область, третьи делят между собой Кировская область и Удмуртская республика.

Экономика Пермского края как части Приволжского федерального округа также не базируется на металлургической промышленности. Отрасль представлена такими металлургическими предприятиями, как ОАО «Чусовский металлургический завод в городе Чусовой (черная металлургия) и АО «Ависма» в г. Березники и магниевый завод в г. Соликамске (цветная металлургия). Основные показатели металлургической промышленности в Пермском крае представлены в табл. 4.

Таблица 4. Социально-экономические показатели металлургической промышленности Пермского края, 2014-2016 гг.*

Table 4. Socio-economic indicators of metallurgical industry of Perm region, 2014-2016 years*

Показатель	2014	2015	2016	Темп роста, %	Темп прироста, %
Среднемесячная номинальная з/п работников, руб.	25449,4	28186,1	30921,7	121,5	21,5
Оборот организаций, млн. руб.	52006,2	60223,3	53320,1	102,5	2,5
Индекс производства, %	104,2	85,6	102,8	98,7	-1,3
Объем отгруженных товаров собственного производства, услуги, млн. руб.	43763,7	55216,7	53663,8	122,6	22,6
Индекс цен производителей, %	106,7	126,3	101,6	95,2	-4,8

*Составлено по данным [8- 12]

За последние три года доступных данных наблюдался рост показателей индекса производства (85,6% в 2015 против 102,8% в 2016 году) и среднемесячная номинальная заработная плата работников (28186 и 30921 рублей соответственно). По остальным показателям произошло снижение: например, незначительный спад в объемах отгруженных товаров и оказываемых услуг в металлургии составил около 2000 млн. рублей.

Необходим механизм антикризисного регулирования, который учитывает текущую си-

туацию и ее влияние в среднесрочном периоде (рис. 4).

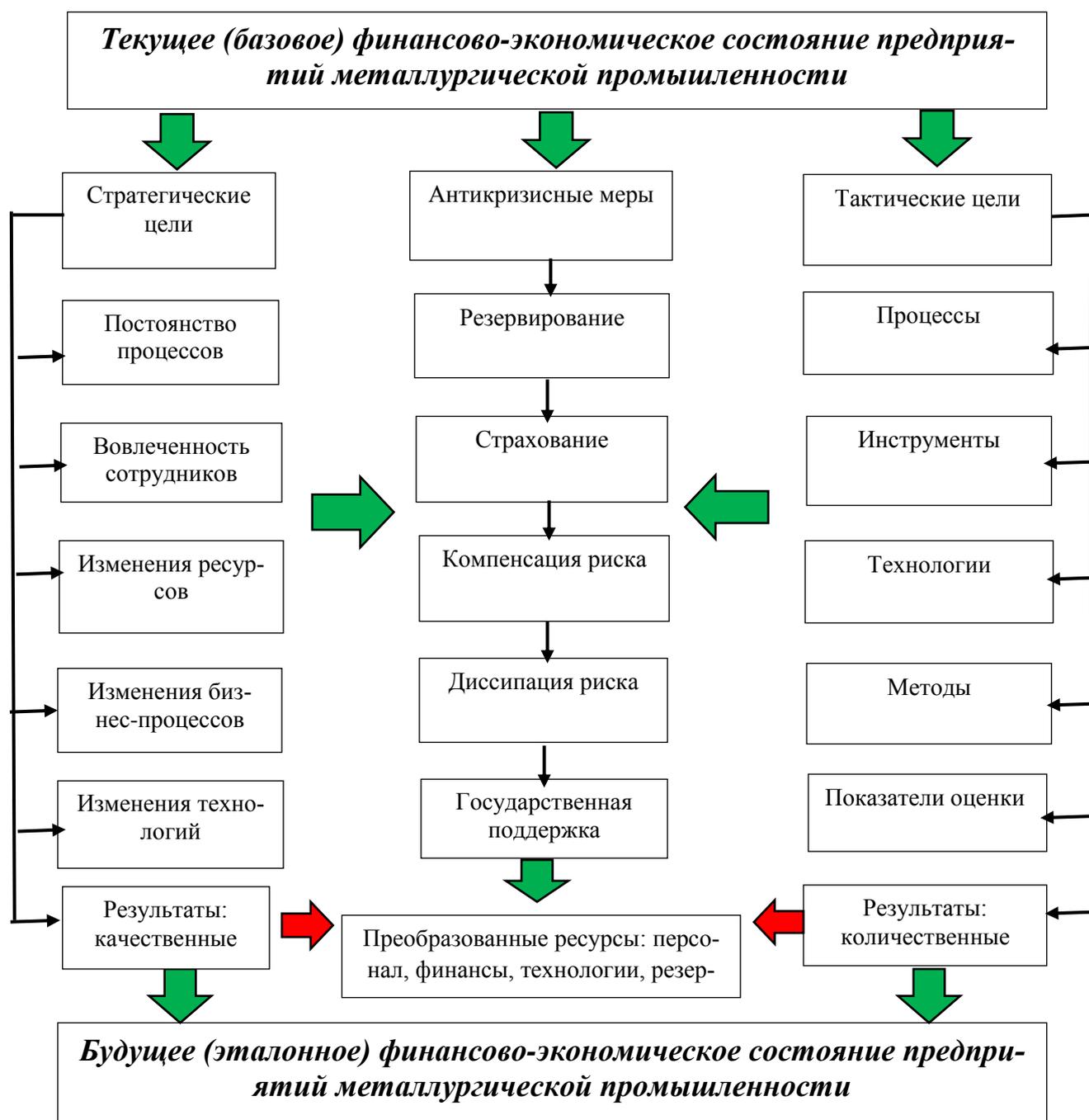


Рис.4. Антикризисный механизм управления предприятиями металлургической промышленности (разработано автором)

Fig. 4. Anti-crisis management mechanism of enterprises of metallurgical industry (developed by the author)

В результате анализа статистических данных охарактеризуем имеющиеся проблемы в развитии промышленного производства Приволжского федерального округа и Пермского края: темпы роста промышленного производства нестабильны, зависят от мировых цен на металлургическую продукцию; формирование стратегии в отрасли подвержено влиянию сложно прогнозируемых факторов, имеющих негативное влияние; факторы риска относятся к макроэкономическим и геополитическим, что значительно усложняет разработку системы антикризисного управления и превентивных мероприятий.

Компенсация риска может быть связана с диссипацией и государственной поддержкой,

основывается на частичном возмещении поученного ущерба, например за счет участия в производстве государственной компании, которая частично возьмет на себя основные риски: затраты, убытков, неполучения прибыли.

Вывод. Промышленность является важной составляющей отрасли экономики Пермского края, поэтому стимулирование и поддержка промышленных предприятий является приоритетным направлением деятельности Правительства Пермского края. Работа проводится по нескольким направлениям стимулирования и поддержки промышленности, в числе которых разработка законов и нормативных актов, реализация приоритетных проектов Министерства промышленности, развитие производственных кластеров и помощь предприятиям при участии в федеральных целевых программах.

Экономические санкции, введенные в 2014 году в отношении России многими зарубежными странами, и негативный геополитический фон оказали свое влияние и на отрасль металлургии. Рынок готовой металлургической продукции, обладающий слабой степенью конкурентоспособности на международной арене, подвергся отрицательному воздействию. Это выразилось в разрыве связей с конкретными зарубежными партнерами, что, в свою очередь, вылилось и в уменьшении спроса на внутреннем рынке вследствие потери рейтинга, росту конкуренции на региональном и местном уровне, что привело к ухудшению показателей их деятельности.

Проблемы падения темпов промышленного производства связаны со следующими факторами: зависимость от уровня цен на мировых рынках; недостаточная диверсификация промышленного производства; высокая степень износа основных производственных фондов и низкие темпы их обновления; низкий уровень использования производственных мощностей; недостаточное количество финансово-экономических возможностей для инновационного развития; недостаточная доля продукции с высокой добавленной стоимостью.

Также произошло повышение цен на рынке металлопроката, которое в 2016 году было остановлено. Существовали проблемы, связанные с нелегальным ввозом продукции на территорию Пермского края, которые на данный момент отсутствуют. Однако нельзя забывать о том, что подобные препятствия открывают новые возможности для развития сотрудничества с предприятиями регионального масштаба и модернизации собственных производств с использованием инновационных технологий. Совершенствование металлургического комплекса также может происходить с помощью закупки нового оборудования, произведенного на территории России, привлечения частных инвесторов из других регионов, где конкуренция достаточно высока в сравнении с краевым рынком, создания новой инфраструктуры, выраженной в строительстве новых дорог и железнодорожных путей для транспортировки товаров и сырья.

Можно сделать вывод о том, что промышленное производство в г. Перми и Пермском крае находится на достаточно высоком уровне, по отрасли доминирует обрабатывающая промышленность. В целом все предприятия являются конкурентоспособными и рентабельными, имеют достаточно большое количество заказов не только от субъектов Российской Федерации, но и от иных иностранных компаний и заинтересованных частных организаций. Металлургическая промышленность может снизить потери от макроэкономических и геополитических факторов за счет системного подхода к формированию антикризисного механизма управления, который заключается в привлечении государственных компаний в распределении рисков и компенсации потерь.

Библиографический список:

1. Адырхаева Г.Д. Усиление конкурентных преимуществ предприятий пищевой промышленности // Проблемы совершенствования организации производства и управления пром. предприятиями: межвуз. сб. науч. тр. 2014. № 1. С. 11-14.
2. Воронов А.С. К вопросу о типах региональных инновационных кластеров// Статистика и экономика. 2016. С. 52-61
3. Гилязова Е.Е., Кобелев В.Н., Макарова И.В. Формирование инновационного каркаса промышленности Пермского края// Экономика региона. 2010. № 6. С. 47-56.

4. Красильников Г.Д., Урасова А.А. Развитие легкой промышленности в Пермском крае в современных условиях: проблемы и перспективы// Вестник Пермского университета. Серия экономика. 2016. № 9. С. 85-92.
5. Кутыин, В.М. Территориальная экономическая кластеризация (классификация) регионов России: социально-географический аспект / В.М. Кутыин // Безопасность Евразии. 2003. № 1. С. 523-528.
6. Никонов Б. О пользе кластеров для российской экономики // Статистика и экономика. 2013. С. 32-38
7. Малышев Ю.А., Камалов А.И. Институциональный подход и инновационная парадигма в развитии промышленной политики Пермского края// Вестник Пермского университета: Серия Экономика. 2010. № 11. С. 95-104.
8. Министерство промышленности, предпринимательства и торговли Пермского края//Промышленность[Электронный ресурс] URL:<http://www.minpromtorg.permkrai.ru/industry/industry/> (дата обращения 20.04.18).
9. Отчет о функционировании ЕЭС России в 2017 году// Постановление Правительства Пермского края от 27 апреля 2012 года N 246-п [Электронный ресурс] URL: http://so-ups.ru/fileadmin/files/company/reports/disclosure/2018/ups_rep2017.pdf. (дата обращения 27.04.18).
10. О состоянии промышленного комплекса Пермского края и мерах, принимаемых Правительством Пермского края по сохранению и развитию промышленного потенциала региональной экономики 2017. [Электронный ресурс] URL: http://www.msu.zsperm.ru/s1/Docs/O_sostoyanii_promyshlennogo-kompleksa-Permskogo-kрая.pdf (дата обращения 27.04.18).
11. Permskii krai v tsifrakh. 2017: Kratkii statisticheskiisbornik. Territorial'nyi organ Federal'nogo sluzhbygosudarstvennoistatistikipoPermskomukrayu. Perm'; 2017. 180 s. [Electronny resurs] URL: http://permstat.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_ts/permstat/resources/28dd5a004155dcbab9d7bda3e1dde74c/Пермский+край+в+цифрах+2017.pdf (dataobrachsheniya 20.04.18).[Perm region in figures. 2017: A Brief Statistical Digest. Territorial body of the Federal State Statistics Service for Perm Krai. Perm'; 2017. 180 p. [Electronic resource] URL: http://permstat.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_ts/permstat/resources/28dd5a004155dcbab9d7bda3e1dde74c/Пермский+край+в+цифрах+2017.pdf (access date 20.04.18). (in Russ.)]
12. Пермский край. Развитие nanoиндустрии в регионе. [Электронный ресурс] URL:<http://www.rusnanonet.ru/regions/perm/info/>(дата обращения 20.04.18).
13. Портер М. Конкуренция: пер. с англ. – М.: Вильямс, 2005. – 608 с.
14. Пыткин А.Н., Урасова А.А. Специфика развития металлургической отрасли в Пермском крае в условиях действия фактора ВТО и экономических санкций// Вестник УГНТУ. Наука, образование, экономика. Серия Экономика. 2015. № 2 С.62-69.
15. Соколенко С.И. Производственные системы глобализации: Сети. Альянсы. Партнерства. Кластеры. – Киев: Логос, 2002. – 645 с
16. Урасова А.А. Особенности развития пищевой промышленности в Пермском крае в современных условиях// Arsadministrandi. 2015. № 7. С. 84-89
17. Хааг Д. Кластеры как инструмент развития некоммерческих организаций. М.: Инфра-М, 2012.152 с.

References:

1. Adyrkhaeva G.D. Usilenie konkurentnykh preimushchestv predpriyatii pishchevoi promyshlennosti. Mezhvuz. sb. nauch. tr. "Problemysovershenstvovaniyaorganizatsii proizvodstva i upravleniya prom. predpriyatiyami". 2014;1:11-14. [Adyrkhaeva G.D. Strengthening of competitive advantages of food industry enterprises. Interuniversity collection of scientific works "Problems of improving the organisation of production and management of industrial enterprises". 2014;1:11-14. (in Russ.)]
2. Voronov A.S. K voprosu o tipakh regional'nykh innovatsionnykh klasterov. Statistika i ekonomika. 2016;3:52-61 [Voronov A.S. On the question about the types of regional innovative clusters. Statistics and Economics. 2016;3:52-61. (in Russ.)]
3. Gilyazova E.E., Kobelev V.N., Makarova I.V. Formirovanie innovatsionnogo karkasa promyshlennosti Permskogo kraia. Ekonomika regiona. 2010;6:47-56.[Gilyazova E.E., Kobelev V.N., Makarova I.V. Formation of an innovative frame of industry in Perm Krai. Economy of Region. 2010;6:47-56. (in Russ.)]
4. Krasil'nikov G.D., Urasova A.A. Razvitie legkoi promyshlennosti v Permskom krae v sovremennykh usloviyakh: problemy i perspektivy. Vestnik Permskogo universiteta. Seriya ekonomika. 2016;9:85-92.[Krasil'nikov G.D., Urasova A.A. Development of light industry in the Perm Krai in modern conditions: problems and prospects. Perm University Herald. Economy. 2016;9:85-92. (in Russ.)]
5. Kut'in V.M. Territorial'naya ekonomicheskaya klasterizatsiya (klassifikatsiya) regionov Rossii: sotsial'no-geograficheskii aspekt. Bezopasnost' Evrazii. 2003;1:523-528.[Kut'in V.M. Territorial economic clusterisation (classification) of Russian regions: socio-geographical aspect. Bezopasnost' Evrazii. 2003;1:523-528. (in Russ.)]

6. Nikonov B. O pol'ze klasterov dlya rossiiskoi ekonomiki. Nevskoe vremya. 26 fevralya 2003. [Nikonov B. About the benefits of clusters for the Russian economy. Nevskoe vremya. 26 February 2003. (in Russ.)]
7. Malyshev Yu.A., Kamalov A.I. Institutsional'nyipodkhodiinnovatsionnaya paradigmatvrazvitiipromyshlennoipolitikiPermskogokraya. Vestnik Permskogo universiteta: Seriya Ekonomika. 2010;11:95-104. [Malyshev Yu.A., Kamalov A.I. Institutional approach and innovative paradigm in the development of industrial policy of Perm Krai. Perm University Herald. Economy. 2010;11:95-104. (in Russ.)]
8. Ministerstvo promyshlennosti, predprinimatel'stva i trgovli Permskogo kraya//Promyshlennost' [Elektronnyi resurs] URL:<http://www.minpromtorg.permkrai.ru/industry/industry/> (data obrashcheniya 20.04.18). [Ministry of Industry, Entrepreneurship and Trade of the Perm Krai // Industry [Electronic resource] URL:<http://www.minpromtorg.permkrai.ru/industry/industry/> (access date 20.04.18). (in Russ.)]
9. Otchet o funktsionirovanii EES Rossii v 2017 godu// Postanovlenie Pravitel'stva Permskogo kraya ot 27 aprelya 2012 goda N 246-p [Elektronnyi resurs] URL: http://so-ups.ru/fileadmin/files/company/reports/disclosure/2018/ups_rep2017.pdf. (data obrashcheniya 27.04.18). [Report on the functioning of the UES of Russia in 2017 // Resolution of the Government of the Perm Krai of April 27, 2012 No. 246-p [Electronic resource] URL: http://so-ups.ru/fileadmin/files/company/reports/disclosure/2018/ups_rep2017.pdf. (access date 27.04.18). (in Russ.)]
10. Osostoyanii promyshlennogo kompleksa Permskogo kraya i merakh, prinimaemykh Pravitel'stvom Permskogo kraya po sokhraneniyu i razvitiyu promyshlennogo potentsiala regional'noi ekonomiki 2017. [Elektronnyi resurs] URL: http://www.msu.zsperm.ru/s1/Docs/O_sostoyanii_promyshlennogo-kompleksa-Permskogo-kraya.pdf (data obrashcheniya 27.04.18). [On the state of the industrial complex of Perm Krai and measures taken by the Government of the Perm Krai to preserve and develop the industrial potential of the regional economy 2017. [Electronic resource] URL: http://www.msu.zsperm.ru/s1/Docs/O_sostoyanii_promyshlennogo-kompleksa-Permskogo-kraya.pdf (access date 27.04.18). (in Russ.)]
11. Permskii krai v tsifrakh. 2017: Kratkii statisticheskii sbornik. Territorial'nyi organ Federal'noi sluzhby gosudarstvennoi statistiki po Permskomu krayu. Perm'; 2017. 180 s. [Elektronnyi resurs] URL: http://permstat.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_ts/permstat/resources/28dd5a004155dcbab9d7bda3e1dde74c/Permskii+krai+v+tsifrakh+2017.pdf (data obrashcheniya 20.04.18). [Perm region in figures. 2017: A Brief Statistical Digest. Territorial body of the Federal State Statistics Service for Perm Krai. Perm'; 2017. 180 p. [Electronic resource] URL: http://permstat.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_ts/permstat/resources/28dd5a004155dcbab9d7bda3e1dde74c/Permskii+krai+v+tsifrakh+2017.pdf (access date 20.04.18). (in Russ.)]
12. Permskii krai. Razvitie nanoindustrii v regione. [Elektronnyi resurs] URL:<http://www.rusnanonet.ru/regions/perm/info/>(data obrashcheniya 20.04.18). [Perm Krai. Development of nanoindustry in the region. [Electronic resource] URL:<http://www.rusnanonet.ru/regions/perm/info/>(access date 20.04.18). (in Russ.)]
13. Porter M. Konkurentsia. M.: Vil'yams; 2005. 608 s. [Porter M. Competition. M.: Vil'yams; 2005. 608 p. (in Russ.)]
14. Pytkin A.N., Urasova A.A. Spetsifika razvitiya metallurgicheskoi otrasli v Permskom krae v usloviyakh deistviya faktora VTO i ekonomicheskikh sanktsii. Vestnik UGNTU. Nauka, obrazovanie, ekonomika. Seriya Ekonomika. 2015;2:62-69. [Pytkin A.N., Urasova A.A. Development specificity of the metallurgical industry in the Perm Krai in the context of the WTO factor and economic sanctions. Bulletin USPTU. Science, education, economy. Series economy. 2015;2:62-69. (in Russ.)]
15. Sokolenko S.I. Proizvodstvennye sistemy globalizatsii: Seti. Al'yansy. Partnerstva. Klasteri. Kiev: Logos; 2002. 645 s. [Sokolenko S.I. Production systems of globalisation: Networks. Alliances. Partnership. Clusters. Kiev: Logos; 2002. 645 p. (in Russ.)]
16. Urasova A.A. Osobennosti razvitiya pishchevoi promyshlennosti v Permskom krae v sovremennykh usloviyakh. Ars administrandi. 2015;7:84-89. [Urasova A.A. Development features of the food industry in the Perm Krai in modern conditions. Ars administrandi. 2015;7:84-89. (in Russ.)]
17. Khaag D. Klasteri kak instrument razvitiya nekommercheskikh organizatsii. M.: Infra-M; 2012.152 s. [Khaag D. Clusters as a tool for the development of non-profit organisations. M.: Infra-M; 2012.152 p. (in Russ.)]

Сведения об авторе:

Оборин Матвей Сергеевич – доктор экономических наук, профессор.

Information about the author:

Matvey S. Oborin – Dr. Sci. (Economics), Prof.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 10.04.2018.

Принята в печать 10.06.2018.

Conflict of interest.

The author declare no conflict of interest.

Received 10.04.2018.

Accepted for publication 10.06.2018.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

Верстка журнала осуществляется с электронных копий. Используется компьютерная обработка штриховых и полутоновых (в градациях серого) рисунков. Журнал изготавливается по технологии офсетной печати. В редакцию журнала необходимо представить:

- распечатку рукописи (2 экз.); распечатка должна представлять собой письменную копию файла статьи;
- электронную копию (допустима передача по электронной почте);
- экспертное заключение о возможности опубликования в открытой печати (1 экз.);
- метаданные авторов (1 экз.);

Правила оформления текста

Текст подготавливается в текстовом редакторе MicrosoftWord. Статья должна предусматривать разделы: «Введение», «Постановка задачи», «Методы исследования», «Обсуждение результатов», «Вывод». Объем непосредственно содержания статьи должен составлять не менее 9 -10 страниц машинописного текста.

Формулы подготавливаются во встроенном редакторе формул MicrosoftWord или в редакторе MathType.

Шрифтовое начертание обозначений в формулах, в таблицах и в основном тексте должно быть полностью идентичным.

Ссылки на формулы и таблицы даются в круглых скобках, ссылки на использованные источники (литературу) - в квадратных скобках.

Формат бумаги А4. Параметры страницы: поля - левое 3 см, верхнее и нижнее 2 см, правое 1,5 см; колонтитулы отсутствуют.

Элементы заглавия публикуемого материала

- УДК/ББК
- Перечень авторов (разделяется запятыми, инициалы после фамилий, на русском и английском языке); выравнивание слева.
- Название статьи (на русском и английском языке).
- Аннотация (Abstract) – 200-250 слов, характеризующих содержание статьи (на русском и английском языке).
- Ключевые слова (keywords) 5-10 слов или словосочетаний, отражающих содержание статьи (на русском и английском языке).

Каждый элемент заглавия приводится, начиная с новой строки; выравнивание проводится по центру.

Основной текст

Шрифт TimesNewRoman 12 pt, выравнивание по ширине, первая строка с отступом 1,25 см, межстрочный интервал - 1.

Библиографический список

В статье указывается строка с текстом «Библиографический список». Библиографический список на русском языке выполняется по ГОСТ Р 7.0.5 -2008.

Библиографический список должен составлять не менее 20 наименований источников литературы, среди которых от 30-70 % ссылок на иностранные источники. Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

Обязательно цитирование современных работ, изданных по тематике статьи за последние 5 лет. Доля ссылок на статьи авторов рукописи, изданных ранее, не должна превышать 20% от общего количества ссылок.

Библиографический список обязательно должен быть переведен на английский язык. «References» должен быть составлен по стандарту «Ванкувер».

Ссылки на материалы, размещенные на электронных носителях, следует допускать в крайнем случае.

Редакция оставляет за собой право потребовать от автора замены ссылки, если на момент обработки статьи по указанному адресу материал будет отсутствовать.

Справка об авторах

Включает для каждого автора фамилию, имя, отчество (полностью), ученую или академическую степень, ученое звание, название и полный адрес места работы. Обязательно указывается адрес электронной почты. Сведения представляются на русском и английском языках.

Верстка формул

Формулы подготавливаются во встроенном редакторе формул MicrosoftWord или в редакторе MathType; нумеруются только те формулы, на которые есть ссылки в тексте статьи; использование при нумерации букв и других символов не допускается.

Выписанные в отдельную строку формулы выравниваются по середине строки, номер заключается в круглые скобки и выравнивается по правому краю текста. Все впервые встречающиеся в формуле обозначения должны быть расшифрованы сразу после формулы.

Верстка рисунков

Рисунки, представляющие собой графики, схемы и т. п., должны быть выполнены в графических векторных редакторах (встроенный редактор MicrosoftWord, CorelDraw, MicrosoftVisio и т. п.). Использование точечных форматов (.bmp, .jpeg, .tif, .html) допустимо только для рисунков, представление которых в векторных форматах невозможно (фотографии, копии экрана монитора и т. п.). Название рисунка указывается на русском и английском языках.

Верстка таблиц

Таблица состоит из следующих элементов: нумерационного заголовка (слова «Таблица» и ее номера арабскими цифрами); шапки (заголовочной части), включающей заголовки граф (объясняют значение данных в графах); боковика (первой слева графы) и прографки (остальных граф таблицы). Название таблицы указывается на русском и английском языках.

Требования к рецензированию и хранению рецензий научных статей, поступивших в редакцию журнала

Научная статья, поступившая в редакцию журнала, рассматривается ответственным редактором на соответствие тематике и направлениям журнала, правилам оформления и наличие сопроводительных документов.

Редакция осуществляет рецензирование всех поступающих в редакцию материалов, с целью их экспертной оценки. Все рецензенты являются признанными специалистами по тематике рецензируемых материалов. Рецензии хранятся в редакции издания в течение 5 лет.

При поступлении соответствующего запроса редакция вправе направлять копии рецензий в Министерство образования и науки РФ.

План-график издания журнала

Выпуск 1 (март) – прием статей до 31 декабря предыдущего года;

Выпуск 2 (июнь) – прием статей до 31 марта текущего года;

Выпуск 3 (сентябрь) – прием статей до 30 июня текущего года;

Выпуск 4 (декабрь) – прием статей до 30 сентября текущего года.

Редколлегия оставляет за собой право производить редакционные изменения, не искажающие основное содержание статьи.

Статьи, не отвечающие правилам оформления, к рассмотрению не принимаются. Рукописи и электронные носители авторам не возвращаются. Датой поступления считается день получения редколлгией окончательного текста статьи.

Адрес редакционного совета: 367026, РД, г. Махачкала, пр. И. Шамиля, 70, ФГБОУ ВО «ДГТУ», Учебно-лекционный корпус 2, редакция журнала «Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки». Технические вопросы можно выяснить по электронному адресу: vestnik.dgtu@mail.ru и по телефону 8(8722)62-39-64.

FORMATTING REQUIREMENTS FOR PAPERS

Electronic copies are used when laying out the journal. Computer processing is used for line and halftone (grayscale) graphics. The journal is produced by offset printing technology. Therefore, the following should be submitted to the editor:

- a printout of the manuscript (2 copies.); the printout should be a hard copy of the electronic article file;
- electronic copy (e-mail is acceptable);
- an expert opinion supporting the article's suitability for publication (1 copy);
- Information about authors.

Guidance for the preparation of texts

The text should be prepared in Microsoft Word. The article must include sections entitled: "**Introduction**", "**Background**", "**Methods**", "**Results and Discussion**", "**Conclusion**". The article itself is supposed to comprise at least 9-10 if typewritten pages.

Formulae should be prepared in Microsoft Word's built-in equation editor or MathType.

Font symbols used in formulae, tables and in the main text must be completely identical.

References to formulae and tables are given in round brackets; references to the sources referred to (literature) – in square brackets.

Paper size – A4. Page setup: margins – left 3 cm, top and bottom – 2 cm, right – 1.5 cm; no headers or footers.

Elements of the title of the published material

- UDC / LBC
- List of authors (separated by commas; initials after surnames; in Russian and English); alignment *right*.
- Title of the article (in Russian and English).
- Abstract – 200-250 words or 850 characters describing the content of the article (in Russian and English).
- Keywords – 5-10 words or phrases that reflect the content of the article (in Russian and English).

Each title element should start on a new line; aligned centre.

Body text

Font TimesNewRoman 12 pt, full justification, first line with 1.25 cm indentation, line spacing – 1.

Bibliography

The bibliography list should be entitled References. References in Russian prepared according to GOST R 7.0.5 -2008.

The reference list is considered to include at least 20 names of literature sources, including 30–70% of references to foreign sources. References to unpublished works are not permitted.

Only recent works on the subject of the article published within the past 5 years should be cited. The proportion of references to articles previously published by the authors should not exceed 20% of the total number of references.

The bibliography must be translated into English. "References" should be drawn up according to the "Vancouver" standard. Please indicate your chosen standard when formulating the bibliography.

Links to material on electronic media shall be allowed as a last resort. The editors reserve the right to require a replacement reference from the author if an item is absent at a specified address at the time of processing of the article.

Information about authors

For each author, the following information should be provided: first name, middle name (or patronymic) and last name, scientific or academic degree, academic title, brief academic biography (no more than 5-6 lines), name and full address of place of work. The specification of an email address is mandatory.

Composition of formulas

Formulas should be prepared in the built MicrosoftWord equation editor or MathType Editor; only those formulas that are referenced in the text should be numbered; the use of letters or other characters is not permitted when enumerating equations.

Formulas written out on a separate line are aligned to the middle of the line; their respective numbers shall be in parentheses and right-aligned. All symbols occurring in the formula for the first time must be decoded immediately after the formula.

Layout of figures

Drawings, consisting of graphs, charts, etc. should be prepared in graphic vector editors (the internal editor of MicrosoftWord, CorelDraw, MicrosoftVisio etc.). The use of bitmap formats (.bmp, .jpeg, .tif) is only permissible for graphics whose presentation is not possible in vector formats (photos, screenshots, etc.).

Layout of tables

A table should consist of the following elements: numerical title (the word "Table" and its number in Arabic numerals); title (header section) including column headings (explaining the meaning of the data in the columns); side heading (the first column on the left) and the table body (the other columns of the table).

Reviewing requirements for and saving of scientific article reviews, received by the journal editorial staff

A scientific article received by the editorial office is considered by the responsible editor in terms of its compliance with topics and directions of the magazine, formatting guidelines and availability of supporting documents.

The editorial staff carries out a review of all incoming materials to the editor with a view to peer review. All reviewers are acknowledged experts on the topic of the peer-reviewed material. Reviews are stored at the editorial office for 5 years.

On receipt of a proper request, editorial staff have the right to submit copies of reviews to the RF Ministry of Education and Science.

Publication schedule

Issue 1 (March) – articles accepted until 31 December of the previous year;

Issue 2 (June) – articles accepted until March 31 of the present year;

Issue 3 (September) – articles accepted until 30 June of the present year;

Issue 4 (December) – articles accepted until September 30 of the present year;

The Editorial Board reserves the right to make editorial changes which do not distort the main content of the article.

Articles that do not conform to formatting guidelines will not be taken into consideration. Manuscripts and electronic media will not be returned. The date of acceptance shall be deemed to be the date of receipt of the final text by the editorial board.

Address of the editorial board: 70 ImamaShamilya Ave., Makhachkala 367026, Daghestan, Russia. Daghestan State Technical University, Tutorial-Lecture Building 2, Editorial Board «Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences». Technical questions can be clarified by e-mail: vestnik.dgtu@mail.ru or by telephone 8 (8722) 62-39-64.

Министерство высшего образования и науки Российской Федерации
Ministry of Higher Education and Science of the Russian Federation



ВЕСТНИК
ДАГЕСТАНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА.
ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ
Махачкала, Том 45– №2 – 2018.

HERALD
OF DAGHESTAN STATE TECHNICAL UNIVERSITY. TECHNICAL SCIENCES
Makhachkala, Volume 45, No.2, 2018.

Верстка: Шагина С.Б.

Адрес редакции:

367026, РД, г. Махачкала, пр. И.Шамиля, 70, ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный
технический университет»

Тел./факс(8722)623715
(8722)623964

E-mail: vestnik.dgtu@mail.ru Website: <http://vestnik.dgtu.ru>

Layout: Svetlana B.Shagina

Editorial and Publisher address: 70 I. Shamil Ave., Makhachkala 367026, Daghestan, Russia.

FSBEE HE «DSTU»
Tel./fax (8722)623715
(8722)623964

«БЕСПЛАТНО»

Подписано в печать 30.06.2018г. Сдано в печать 30.06.2018г.
Формат 60x84 ¹/₈. Гарнитура «Times». Бумага офсетная
Тираж 500. Усл. п.л. 27,06 Уч. изд.л. 26,55
Заказ № ____

Отпечатано в типографии ООО «Издательство «Лотос»
367018. Республика Дагестан, г. Махачкала, пр-кт Петра I, 61.