

ISSN(Print) 2073-6185

ISSN (On-line) 2542-095X

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation

Федеральное государственное бюджетное образовательное

учреждение высшего образования

«Дагестанский государственный технический университет»



Том 45, №3, 2018.

ВЕСТНИК

ДАГЕСТАНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА.
ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Volume 45, No.3, 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; Google Scholar; Dimensions; 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; Dimensions; Ulrich's Periodicals Directory; Open Archives; Research Bible; Directory of Open Access Journals (DOAJ); Socionet; CyberLeninka.

© Founder and Publisher Daghestan State Technical University, 2018.

СОДЕРЖАНИЕ

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

МЕХАНИКА 8

Культербаев Х.П., Абдул Салам И.М., Пайзулаев М.М.

СВОБОДНЫЕ ПРОДОЛЬНЫЕ КОЛЕБАНИЯ ВЕРТИКАЛЬНОГО СТЕРЖНЯ С ДИСКРЕТНЫМИ МАССАМИ ПРИ НАЛИЧИИ СИЛ ДЕМПФИРОВАНИЯ 8

Ратманова О.В., Шляхин Д.А.

ПОДБОР ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЛЯ КРУГЛЫХ МНОГОСЛОЙНЫХ ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИХ ПЛАСТИН 18

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ

МАШИНОСТРОЕНИЕ 28

Ахмедов Г.Я., Курбанисмаилова А.С.

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ СИСТЕМ ПРИ ИЗВЛЕЧЕНИИ ПОПУТНЫХ ГАЗОВ 28

Баранов А.Ю., Василенок А.В., Соколова Е.В., Шестакова Е.А.

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОИЗВОДСТВА ЭФФЕКТИВНОЙ АППАРАТУРЫ ДЛЯ ОБЩЕГО КРИОТЕРАПЕВТИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ 39

Бекренев Н.В., Злобина И.В.

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОТВЕРЖДЕННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ, АРМИРОВАННЫХ УГЛЕРОДНЫМИ ВОЛОКНАМИ 58

Евдулов Д.В., Исмаилов Т.А., Казумов Р.Ш., Саркаров Т.Э.

НАТУРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ОПЫТНОГО ОБРАЗЦА ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ, ОСНОВАННОЙ НА СОВМЕСТНОМ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СИЛЬНОТОЧНЫХ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ БАТАРЕЙ И ЦЕЛЬНОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТЕПЛОПРОВОДОВ 68

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ 76

Асланов Т.Г., Ибрагимов С.А.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОПОЛОГИИ АНТЕННЫ ВИВАЛЬДИ С ЗЕРКАЛЬНЫМ РАСПОЛОЖЕНИЕМ ЛЕПЕСТКОВ 76

Багутдинов Р.А.

ПОДХОД К ОБРАБОТКЕ, КЛАССИФИКАЦИИ И ОБНАРУЖЕНИЮ НОВЫХ КЛАССОВ И АНОМАЛИЙ В РАЗНОРОДНЫХ И РАЗНОМАСШТАБНЫХ ПОТОКАХ ДАННЫХ 85

Величко М.А., Гладких Ю.П., Сатлер О.Н.

КАЛИБРОВКА УЛЬТРАЗВУКОВОГО РАСХОДОМЕРА ПО СЕТИ WI-FI С ПОМОЩЬЮ WEB-БРАУЗЕРА 94

Довгаль В.М., Хеин Мин Зо

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ АНАЛИЗА И ОБРАБОТКИ РЕЧЕВЫХ СИГНАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЕЙВЛЕТОВ 103

Дровникова И.Г., Змеев А.А., Rogozin E.A.

ЧАСТНАЯ МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ ТРЕБОВАНИЙ К СИСТЕМАМ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ ОТ НЕСАНКЦИОНИРОВАННОГО ДОСТУПА В АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА 114

Мирземагомедова М.М., Мурадов М.М. ПРОГРАММНОЕ ПРИЛОЖЕНИЕ ДЛЯ РАСЧЕТА МОДЕЛИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ИННОВАЦИОННОГО РАЗВИТИЯ ОТРАСЛЕЙ	123
СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА	134
Абакаров А.Д., Зайнулабидова Х.Р. СЕЙСМИЧЕСКАЯ РЕАКЦИЯ НЕЛИНЕЙНОЙ СИСТЕМЫ СЕЙСМОЗАЩИТЫ С КИНЕМАТИЧЕСКИМИ ОПОРАМИ.....	134
Алхасова Ю.А., Гаджиев А.М., Хаджишалапов Г.Н., Хежеев Т.А. ВЛИЯНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРОРАЗОГРЕВА НА ФИЗИКО-ТЕРМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЖАРОСТОЙКОГО КЕРАМЗИТОБЕТОНА НА ОСНОВЕ КОМПОЗИЦИОННОГО ВЯЖУЩЕГО ИЗ МЕСТНОГО МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ	145
Баутдинов Д.Т., Джамалудинов М.М., Жукова К.С. НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ОБДЕЛКИ БЕЗНАПОРНОГО ГИДРОТЕХНИЧЕСКОГО ТУННЕЛЯ КРУГОВОЙ ФОРМЫ, ПРОЛОЖЕННОГО В АНИЗОТРОПНОМ СКАЛЬНОМ ГРУНТЕ	155
Батманов Э.З., Гасанов Т.Г., Гусейнов М.Р. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ ГРУНТОВ ПАССИВНЫМ РАБОЧИМ ОРГАНОМ ДРЕНОУКЛАДЧИКА ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ЗАКРЫТОГО ДРЕНАЖА	165
Белова Н.А., Кортюченко Л.П., Страхова Н.А. ДОБАВКИ В БИТУМЫ	175
Иващенко Ю.Г., Мамешов Р.Т., Мухамбеткалиев К.К. ГЛИНОСОДЕРЖАЩИЕ СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОМПОЗИТЫ НА ОСНОВЕ ХИМИЧЕСКИ АКТИВИРОВАННОГО СЫРЬЯ И ОРГАНИЧЕСКИХ СВЯЗУЮЩИХ	185
Муселемов Х.М., Устарханов О.М., Юсупов А.К. ВЕРОЯТНОСТНЫЙ РАСЧЕТ СЕЙСМОСТОЙКОСТИ ЗДАНИЯ НА КИНЕМАТИЧЕСКИХ ОПОРАХ	194
Нахаев М.Р., Саламанова М.Ш., Узаева А.А. ВЛИЯНИЕ ГРАНУЛОМЕТРИИ БАРХАННЫХ ПЕСКОВ НА СВОЙСТВА РЕМОНТНЫХ МОДИФИЦИРОВАННЫХ СОСТАВОВ	212
Омаров А.О., Оцоков К.А. СНИЖЕНИЕ ТРУДОЕМКОСТИ ОПАЛУБОЧНЫХ РАБОТ ПУТЕМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕСТНЫХ ЗАПОЛНИТЕЛЕЙ И ОТХОДОВ ПРОИЗВОДСТВА	221
ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ	
Четин Т.Э. ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ И ЭФФЕКТИВНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОБОРОТНЫХ СРЕДСТВ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ	231
ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ	241

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;

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. Davidyuk, Doctor of Technical Science, Honored Builder of Russia, Director, Gvozdev NIIZHB, 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. Krugljakov, 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. Nesvetaev, 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. Khadzhishalapov, 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. Djanakov, 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.3
Makhachkala,
2018–248p.

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

Husen P. Kulterbaev, Abdul-Salam Igab Mazen, Magomed M. Payzulaev

FREE LONGITUDINAL VIBRATIONS OF A VERTICAL ROD WITH DISCRETE MASSES WITH DAMPING FORCES 8

Olesya V. Ratmanova, Dmitiy A. Shlyakhin

THE SELECTION OF GEOMETRIC CHARACTERISTICS FOR CIRCULAR MULTI-LAYERED PIEZOELECTRIC PLATES 18

TECHNICAL SCIENCE

POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL MECHANICAL ENGINEERING28

Ganapi Ya.Akhmedov, Azha S. Kurbanismailova

DEVELOPMENT OF THE TECHNIQUE OF OPERATION OF GEOTHERMAL SYSTEMS WHEN EXTRACTING ASSOCIATED GASES 28

Alexander Yu. Baranov, Anna V.Vasilenok, Ekaterina V. Sokolova, Olga A. Shestakova

THERMOPHYSICAL BASES OF PRODUCTION OF EFFECTIVE EQUIPMENT FOR GENERAL CRYOTHERAPEUTIC EXPOSURE 39

Nikolaj V. Bekrenev, Irina V. Zlobina

STUDYING THE INFLUENCE OF MICROWAVE RADIATION ON THE THERMOPHYSICAL CHARACTERISTICS OF REVERSED POLYMER COMPOSITION MATERIALS REINFORCED BY CARBON FIBERS 58

Denis V. Evdulov, Tagir A.Ismailov, Revshan Sh. Kazumov, Tadjedin E. Sarkarov

NATURAL TESTS OF THE EXPERIMENTAL SAMPLE OF THE THERMOELECTRIC SYSTEM, BASED ON JOINT USE OF HIGH-CURRENT THERMOELECTRIC BATTERIES AND ALL-METAL THERMAL CONDUCTORS 68

COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT76

Tagirbek G. Aslanov, Syltansaid A. Ibragimov

STUDY OF THE TOPOLOGY OF THE VIVALDI ANTENNA WITH A MIRROR ARRANGEMENT OF THE PETALS 76

Ravil A.Bagutdinov

APPROACH OF PROCESSING, CLASSIFICATION AND DETECTION OF NEW CLASSES AND ANOMALIES IN HETEROGENIOUS AND DIFFERENT STREAMS OF DATA 85

Maxim A.Velichko, Yulia P. Gladkikh, Olga N.Satler

CALIBRATION OF ULTRASONIC FLOWMETER FOR WI-FI NETWORK WITH THE HELP OF WEB BROWSER 94

Victor M. Dovgal, Hein Min Zo

COMPARATIVE CHARACTERISTICS OF SOFTWARE SYSTEMS FOR ANALYSIS AND PROCESSING OF SPEECH SIGNALS USING WAVELETS 103

Irina G. Drovnikova, Anatoly A. Zmeev, Evgenii A. Rogozin

PRIVATE TECHNIQUE OF FORMATION OF REQUIREMENTS TO INFORMATION PROTECTION SYSTEMS FROM UNAUTHORIZED ACCESS TO AUTOMATED BATH SYSTEMS USING GENETIC ALGORITHM 114

Madina M. Mirzemagomedova, Marat M. Muradov

SOFTWARE APPLICATION FOR CALCULATING MODELS FORECASTING INNOVATIVE DEVELOPMENT OF INDUSTRIES 123

BUILDING AND ARCHITECTURE 134

Abacar D. Abakarov, Hanzada R. Zajnulabidova SEISMIC REACTION OF NONLINEAR SYSTEM OF SEISMIC DEFENSE WITH KINEMATIC SUPPORTS 134

Yulduz A. Alkhasova, Abdulla M. Gadzhiev, Khaji N Khadzhishalapov, Tolya A. Hezhev

THE EFFECT OF PRELIMINARY ELECTRIC RADIO HEATING ON THE PHYSICAL AND THERMAL CHARACTERISTICS OF THE HEAT-RESISTANT CERAMZITONE-CONCRETE BASED ON COMPOSITIVE BINDER OF LOCAL MINERAL RAW MATERIALS 145

Damir T. Bautdinov, Magomed M. Djamaludinov, Kristina S. Zhukova

STRESSED CONDITION OF THE WRAPPING WITHOUT-DRIVE HYDROTECHNICAL TUNNEL OF THE CIRCULAR FORM, PROPOSED IN ANISOTROPIC ROCK GROUND 155

Edvard Z. Batmanov, Telman G. Gasanov, Marat R. Guseynov

MODELING OF THE PROCESS OF CUTTING MINERAL GROUNDS BY PASSIVE WORKING DRAWNER DURING THE CONSTRUCTION OF CLOSED DRAINAGE 165

Natalia A. Belova, Lyubov P. Korotovenko, Nina A. Strakhova

ADDITIVES TO BITUMENS 175

Yuriy G. Ivaschenko, Raman T. Mameshov, Kayrat K. Mukhambetkaliev

CLAY CONSTRUCTION COMPOSITES BASED ON CHEMICALLY ACTIVATED RAW MATERIALS AND ORGANIC CONNECTORS 185

Hayrulla M. Muselemov, Osman M. Ustarkhanov Abusupyan K. Yusupov

PROBABLE CALCULATION OF BUILDING SEISMIC RESISTANCE ON KINEMATIC SUPPORT 194

Magomed R. Nakhaev, Madina Sh. Salamanova, Aminat A. Uzaeva

THE INFLUENCE OF GRANULOMETRY OF VELLA SANDS ON THE PROPERTIES OF REPAIRED MODIFIED COMPOSITIONS 212

Arif O.Omarov, Kamil A.Otsokov

REDUCTION OF EMPLOYMENT OF FORMULA WORKING BY USING LOCAL FILLERS AND WASTE OF PRODUCTION 221

ECONOMIC SCIENCE 231

Chetin T.E.

SPECIFICS OF FORMATION AND EFFECTIVE USE OF CURRENT ASSETS IN CONSTRUCTION 231

FORMATTING REQUIREMENTS FOR PAPERS 241

Для цитирования: Культербаев Х.П., Абдул Салам И.М., Пайзулаев М.М. Свободные продольные колебания вертикального стержня с дискретными массами при наличии сил демпфирования. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2018; 45(3): 8-17. DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-3-8-17

For citation: Kulterbaev H. P., Abdul-Salam Igab Mazen, Payzulaev M.M. Free longitudinal vibrations of a vertical rod with discrete masses with damping forces. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2018; 45(3): 8-17. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-3-8-17

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ МЕХАНИКА

УДК 534.1

DOI: 10.21822/2073-6185-2018-45-3-8-17

СВОБОДНЫЕ ПРОДОЛЬНЫЕ КОЛЕБАНИЯ ВЕРТИКАЛЬНОГО СТЕРЖНЯ С ДИСКРЕТНЫМИ МАССАМИ ПРИ НАЛИЧИИ СИЛ ДЕМПФИРОВАНИЯ

Культербаев Х.П.¹, Абдул Салам И.М.², Пайзулаев М.М.³

^{1,2}Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова,

^{1,2}360004, г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173, Россия,

³Дагестанский государственный технический университет,

³367026, г. Махачкала, пр. Имама Шамиля, 70, Россия,

¹e-mail: kulthp@mail.ru, ²e-mail: ehabmazenabdulsalam@hotmail.com,

³e-mail: smdstu@mail.ru

Резюме. Цель. Рассматриваются продольные колебания вертикального стержня континуально-дискретной системы при кинематических сейсмических возмущениях в виде стационарного случайного процесса. **Метод.** Предложен и реализован метод определения дисперсии выходного процесса перемещений, использующий представление входного случайного процесса в виде суммы гармонических детерминированных возмущений. **Результат.** Определена функция зависимости дисперсии перемещений от продольной координаты. Продольные колебания вертикальных стержней, находящихся вблизи эпицентра землетрясений, являются опасными для их прочности и устойчивости. Методы конечных разностей и координатного спуска позволяют создавать универсальные алгоритмы и компьютерные программы, легко решающие сложные спектральные задачи. **Вывод.** До настоящего времени исследования о случайных колебаниях зданий и строительных сооружений, а также и нормативные документы посвящались горизонтальным сейсмическим воздействиям и вызванным ими поперечным изгибным колебаниям. Примеры свидетельствуют о необходимости расширения тематики исследований с включением и других типов колебаний: комбинаций продольных с поперечными, угловыми, крутильными, параметрическими и т. д. Данную разработку можно легко адаптировать к колебаниям стержней переменного сечения, к колебаниям континуально-дискретных стержней.

Ключевые слова: продольные колебания, свободные колебания, дискретные массы, демпфирование колебаний, метод конечных разностей

PHYSICAL-MATEMATICAL SCIENCE

MECHANICS

FREE LONGITUDINAL VIBRATIONS OF A VERTICAL ROD WITH DISCRETE MASSES WITH DAMPING FORCES

Husen P. Kulterbaev¹, Abdul-Salam Igab Mazon², Magomed M. Payzulaev³

^{1,2}H.M. Berbekov Kabardino-Balkaria State University,

^{1,2}173 Chernyshevsky Str., Nalchik 3360004, Russia,

³Daghestan State Technical University,

³70 I. Shamil Ave, Makhachkala 367026, Russia,

¹e-mail: kulthp@mail.ru, ²e-mail: ehabmazonabdulsalam@hotmail.com,

³e-mail: smdstu@mail.ru

Abstract Objectives The longitudinal oscillations of a vertical rod of a continually discrete system with kinematic seismic disturbances in the form of a stationary random process are considered. **Method.** A method for determining the variance of the output process of displacements, using the representation of the input random process as a sum of harmonic deterministic perturbations, is proposed and implemented. **Result.** The dependence function of the dispersion of displacements on the longitudinal coordinate is determined. Longitudinal vibrations of vertical rods near the epicenter of earthquakes are dangerous for their strength and stability. The methods of finite differences and coordinate descent allow you to create universal algorithms and computer programs that easily solve complex spectral problems. **Conclusion.** To date, research on random vibrations of buildings and structures, as well as regulatory documents, has been devoted to horizontal seismic effects and transverse bending vibrations caused by them. Examples indicate the need to expand the scope of research with the inclusion of other types of vibrations: combinations of longitudinal with transverse, angular, torsional, parametric, etc. This design can be easily adapted to vibrations of rods of variable cross section, to vibrations of continually discrete rods.

Keywords: longitudinal oscillations, free oscillations, discrete masses, vibration damping, finite difference method

Введение. Продольные колебания вертикальных стержневых строительных сооружений, находящихся вблизи эпицентра землетрясений, представляют большую опасность для их прочности. Утверждается [1,2], что «в эпицентральной зоне вертикальная составляющая доминирует над другими составляющими колебания». В известном газлийском землетрясении 1976 г. вертикальные ускорения поверхности грунта значительно превосходили горизонтальные. Можно предположить, что оно было столь разрушительным именно из-за пренебрежения вертикальными возмущениями при проектировании и строительстве города. В то же время эти колебания остаются малоизученными, в основном в научных исследованиях и нормативных документах рассматриваются поперечные изгибные колебания. Зачастую соответствующие расчётные модели представляются как континуально-дискретные системы, состоящие из участков с распределённой массой и сосредоточенных масс (рис. 1).

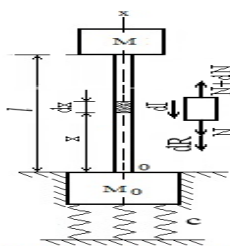


Рис.1. Расчетная схема
Fig.1. Design scheme

Некоторые аспекты проблемы колебаний таких конструкций представлены в работах [3, 4].

Постановка задачи. Рассмотрим вертикальный однородный стержень (рис.1) постоянного сечения, длины l из материала с модулем упругости E , удельным линейно-вязким коэффициентом трения η , с плотностью материала ρ , с площадью поперечного сечения S , несущий на верхнем и нижнем концах дискретные массы M и M_0 и опирающийся на упругое основание с коэффициентом жёсткости c .

Перемещения сечений описываются функцией $u(x, t)$. Они состоят из статической и динамической частей. Статическая часть, составляющая малую долю общих отклонений, образуется от собственного веса и вычисляется легко методами сопротивления материалов, поэтому далее не рассматривается.

Методы исследования. Для изучения свободных колебаний изобразим элементарную частицу стержня и приложенные к ней внутренние силы в сечениях N , $N+dN$, инерционную силу dI и силу демпфирования dR на рис. 1. Применяя к ним принцип Даламбера об уравновешенности таких сил, запишем

$$-dR - N + N + dN - dI = 0.$$

Можно показать, что элементарные выкладки приведут к дифференциальному уравнению в частных производных гиперболического типа для свободных продольных колебаний

$$m\ddot{u} + \eta m\dot{u} - b u'' = 0, \quad b = ES, \quad m = \rho S \quad x \in (0, l), \quad t > -\infty.$$

Преобразуем его к виду, более удобному для дальнейшего употребления

$$\ddot{u} + \eta\dot{u} - a^2 u'' = 0, \quad a^2 = E / \rho. \quad t > -\infty. \quad (1)$$

Сила демпфирования здесь введена по гипотезе Фойгта о линейно-вязком внутреннем трении при колебаниях.

Расчётная схема даёт граничные условия, вытекающие из условий закрепления концов стержня

$$bu'(0, t) - M_0 \ddot{u}(0, t) - cu(0, t) = 0, \quad t > -\infty. \quad (2)$$

$$bu'(l, t) + M\ddot{u}(l, t) = 0, \quad t > -\infty. \quad (3)$$

Решение задачи (1) - (3) запишем с помощью метода разделения переменных как произведение

$$u(x, t) = X(x) e^{\lambda t}, \quad (4)$$

где

$$\lambda = -\mu + j\omega, \quad (5)$$

λ - характеристический показатель, (μ, ω) - собственная пара, состоящая из коэффициента затухания μ и частоты свободных колебаний ω , j - мнимая единица, $X(x)$ - собственная функция. Выбор множителя по времени в (4), (5) основан на очевидности, что колебания являются гармоническими и затухающими.

Подстановка (4) в (1) - (3) после сокращения на $e^{\lambda t}$ даёт

$$\lambda^2 X + \eta\lambda X - a^2 X'' = 0, \quad x \in (0, l). \quad (6)$$

$$bX'(0) - \lambda^2 M_0 X(0) - cX(0) = 0, \quad bX'(l) + \lambda^2 M X(l) = 0. \quad (7)$$

Определить λ аналитическими методами не удаётся.

Выход состоит в применении метода конечных разностей [5] и переходе от аналитической модели задачи (6), (7) к численной. Такой выбор приведёт к универсальным алгоритмам и компьютерным программам, которые легко адаптируются к колебаниям стержней переменного сечения, к разнообразным краевым условиям, к вынужденным колебаниям и т.д.

Следуя указанной цели, вместо непрерывной области определения переменной x введём дискретную область l_h в виде узлов равномерной сетки с шагом h

$$l_h = [x_i: x_i = (i-1)h, \quad i = 1, 2, \dots, n], \quad h = l/(n-1),$$

где n - количество узлов сетки.

Значения функции и производных заменим приближёнными значениями в узлах сетки с точностью $O(h^2)$ для производных

$$X_i(x_i) \approx u(x_i), \quad X''(x_i) \approx \frac{X_{i-1} - 2X_i + X_{i+1}}{h^2} \quad \text{и т.д.}$$

Тогда вместо уравнения (6) получим алгебраические уравнения

$$-X_{i-1} + \alpha X_i - X_{i+1} = 0, \quad i = 2, 3, \dots, n-1, \quad \alpha = 2 + h^2(\lambda^2 + \eta\lambda)/a^2. \quad (8)$$

Граничные условия (6), (7) при этом примут вид

$$\beta X_1 + 4X_2 - X_3 = 0, \quad \beta = -3 - 2h(\lambda^2 M_0 + c)/b, \quad (9)$$

$$X_{n-2} - 4X_{n-1} + \gamma X_n = 0, \quad \gamma = 3 + 2h\lambda^2 M/b. \quad (10)$$

Систему уравнений (8) - (10) можно переписать в матрично-векторной форме

$$A(\lambda)X = 0, \quad (11)$$

где A - квадратная матрица порядка n , $X^T = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ - вектор, компонентами которого являются отклонения стержня в узлах сетки, значок t в верхнем индексе соответствует операции транспонирования.

Легко заметить, что матрица коэффициентов A имеет вид

$$A(\lambda) = \begin{pmatrix} \beta & 4 & -1 & & \vdots & & & & \\ -1 & \alpha & -1 & & \vdots & & & & \\ & -1 & \alpha & -1 & \vdots & & & & \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ & & & & \vdots & -1 & \alpha & -1 & \\ & & & & \vdots & 1 & -4 & \gamma & \end{pmatrix}.$$

Здесь нулевые элементы не выписаны. Система уравнений (11) имеет тривиальное решение $X \equiv 0$, что соответствует статической задаче и не представляет интереса в данном случае.

Ненулевые решения могут существовать при условии, что определитель матрицы A равен нулю, т. е.

$$\det A(\lambda) = 0. \quad (12)$$

Характеристическое уравнение (12) является алгебраическим уравнением n -ой степени относительно λ и имеет множество корней мощности n .

$$\{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n\}.$$

Уравнение (12) с учётом того, что его левая часть представляет комплексную функцию, можно переписать в виде

$$f_1(\mu, \omega) + j f_2(\mu, \omega) = 0, \quad (13)$$

где вещественные функции $f_1(\mu, \omega)$, $f_2(\mu, \omega)$ определяются процедурой вычисления определителя матрицы A .

Из (13) следует, что коэффициент затухания μ и частота свободных колебаний ω должны определяться из системы двух нелинейных алгебраических уравнений

$$f_1(\mu, \omega) = 0, \quad f_2(\mu, \omega) = 0. \quad (14)$$

Найти их аналитическими методами не представляется возможным. Между тем, можно обойтись без явного развёртывания определителя матрицы A и получения формул для корней системы (14), имея в виду применение численных методов и компьютерных программ. В ниже-следующем примере воспользуемся методом координатного спуска, опыт применения которого оказался удачным при решении аналогичных задач [4].

Суть метода состоит в замене задачи на отыскание корней системы уравнений (14) эквивалентной задачей о минимуме специально сконструированной функции

$$\Phi(\mu, \omega) = |\det A(\mu, \omega)| = [f_1^2(\mu, \omega) + f_2^2(\mu, \omega)]^{1/2}, \quad (15)$$

обращающейся в ноль лишь в том случае, если

$$f_1(\mu, \omega) = 0, \quad f_2(\mu, \omega) = 0.$$

Таким образом, решение исходной системы (14) заменяется задачей определения точек нулевого минимума скалярной функции векторного аргумента $\Phi(\mu, \omega)$, так что теперь необходимо решать более простую (по крайней мере в данном случае) задачу

$$\Phi(\mathbf{z}) = 0, \quad \mathbf{z} = \{\mu, \omega\} \in \mathbb{R}^2 \cap (\mu > 0, \omega > 0).$$

Здесь вектор $\mathbf{z}$ соответствует искомым величинам, $\Phi(\mathbf{z})$ представляет мультимодальную функцию, имеющую множество локальных минимумов.

Суть применяемого метода состоит в определении последовательности точек $\mathbf{z}_k$, $k = 0, 1, \dots$, сходящейся к точке локального минимума $\mathbf{z}^*$. При этом в процессе вычислений необходимо добиваться, чтобы значения вспомогательной функции были монотонно убывающими и ограниченными снизу

$$\Phi(\mathbf{z}_0) \geq \Phi(\mathbf{z}_1) \geq \dots \geq \Phi(\mathbf{z}_k) \geq \dots \geq \Phi(\mathbf{z}^*). \quad (16)$$

Для реализации такой цели вначале с помощью численных экспериментов намечается начальная точка последовательности $\mathbf{z}_0$. Затем определяются последующие приближения $\mathbf{z}_k$ с помощью соотношений

$$\mathbf{z}_{k+1} = \mathbf{z}_k + \mathbf{h}_k,$$

где $\mathbf{h}_k$ – вектор приращений координат, обеспечивающий выполнение условий (16).

Условием прекращения вычислительной процедуры а, значит, и признаком достижения корня с необходимой точностью служит выполнение неравенства

$$\Phi(\mathbf{z}_{k+1}) < \delta. \quad (17)$$

Здесь δ – априорно задаваемое малое положительное число (точность вычислений).

Непосредственное решение системы уравнений (15) проведём с помощью метода покоординатного спуска [6].

Алгоритм метода геометрически иллюстрируется рис. 2, где изображен фрагмент поверхности, содержащий одно из нулевых значений функции $\Phi(\mu, \omega)$ в трёхмерном пространстве. На рис. 2 нанесены линии уровня этой поверхности. Процесс отыскания корней (μ_k, ω_k) проходит следующим образом.

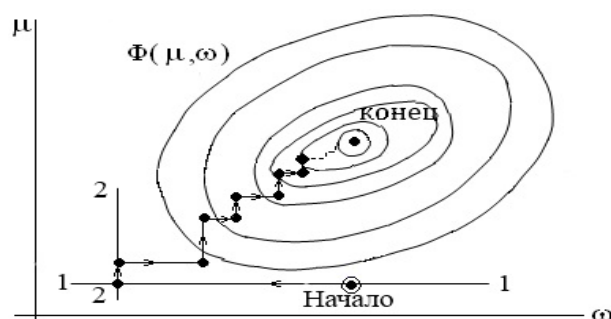


Рис.2. Метод координатного спуска

Fig.2. Coordinate Descent Method

Избирается начальная точка и через неё проводится сечение 1-1. Это означает, что один из аргументов функции μ фиксирован. Вычисляются ординаты функции $\Phi(\omega)$, на экран компьютера выводится её график (рис. 3), вычисления приостанавливаются.

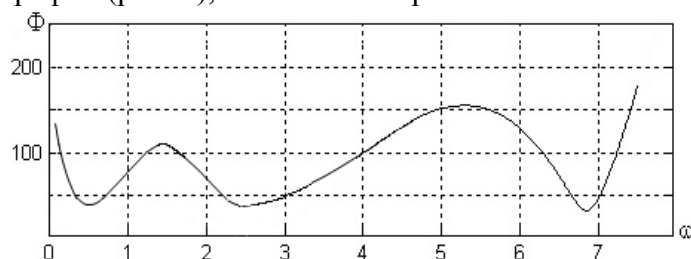


Рис.3. Сечение поверхности Φ

Fig.3. Section of the surface F

По кривой, являющейся сечением поверхности Φ , отчётливо видны условные минимумы функции $\Phi(\omega)$. Отсюда берём, например $\omega_{k1} \approx 0,5$. Это и есть первый шаг спуска вдоль координаты ω . Теперь фиксируем аргумент ω на этом значении, проводим сечение 2-2, строим новый график $\Phi(\mu)$ и на экране видим кривую рис. 4, по которой уточняется $\mu_{k1} (\approx 0,25)$. Этим завершается второй шаг вдоль координаты μ .

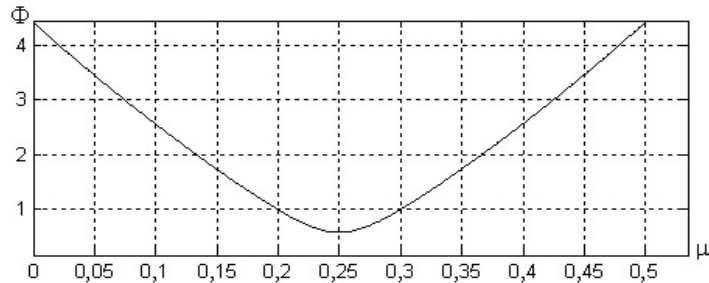


Рис.4. Сечение поверхности Φ
Fig.4. Section of the surface F

Повторение такой процедуры несколько раз приводит к решению системы уравнений (14). В результате будет найдено счётное множество пар $(\mu_1, \omega_1), (\mu_2, \omega_2), \dots$, элементами которых являются коэффициенты затухания и собственные частоты свободных колебаний.

Реализация такого алгоритма аналитическими методами потребует создания сложных вычислительных компьютерных программ для отыскания локальных нулевых минимумов функции $\Phi(\mu, \omega)$. В такой ситуации привлекательным является использование высокоточных графических методов, которые можно реализовать, например, в среде вычислительного комплекса Matlab. Подробности приведены в нижеследующем примере.

Пример 1. Пусть на рис. 1 представлен стержень из стандартной стальной трубы длиной $l = 20$ м, диаметром $D = 108$ мм и толщиной стенки $\delta = 4,71$ мм, опирающийся на фундамент массы $M_0 = 16$ т. Удельный линейно-вязкий коэффициент трения $\eta = 0,1 \text{ с}^{-1}$, коэффициент жёсткости основания $c = 2 \cdot 10^6 \text{ Н/м}$, верхняя несомая масса $M = 7$ т.

Следуя математической модели и алгоритмам, изложенным выше, составляем матрицу $A(\lambda)$ и вспомогательную функцию $\Phi(\mu, \omega)$. Создаём две компьютерные программы, вычисляющие эту функцию и строящие её графики:

1. $\Phi(\omega | \mu)$ при заданном μ на множестве $\omega \in [a_1, b_1]$;

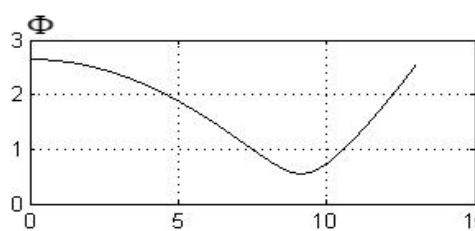


Рис.5. График $\Phi(\omega)$
Fig.5. Graph $F(\omega)$

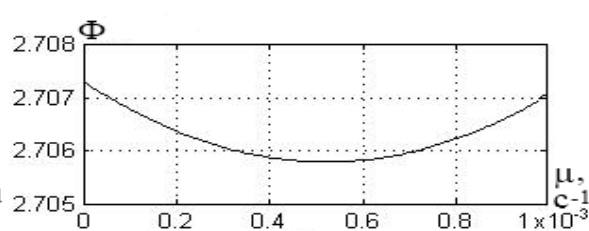


Рис.6. График $\Phi(\mu)$
Fig.6. Graph $F(\mu)$

2. $\Phi(\mu | \omega)$ при заданной ω на множестве $\mu \in [a_2, b_2]$.

Результаты 1 шага, выданные на экран монитора приведены на рис. 5 и 6. На рис. 5 показан график $\Phi(\omega | 1)$. По нему прочитано приближённое первое собственное значение $\omega = 9,17 \text{ с}^{-1}$. Это значение вставляется во вторую программу $\Phi(\mu | 9,17)$ и вычисляется уточнённое значение коэффициента демпфирования $\mu = 0,000521 \text{ с}^{-1}$. Заметим при этом, что вычислительный комплекс Matlab имеет инструменты, позволяющие многократно увеличивать графики рис. 5 и 6 и их фрагменты, так что читаемые по ним значения μ, ω являются хотя и приближёнными, но высокоточными.

Далее начатый процесс, по существу являющийся итерационным по Зейделю, продолжается, пока не будут получены практически неменяющиеся значения пары (μ, ω) и значение $\Phi \approx$

0. Как показали вычисления, для сходимости процесса требуется небольшое количество итераций (2,...4). Первые три собственные пары, полученные по вышеизложенному алгоритму, даны на табл.1.

Таблица 1. Значения показателей

Table 1. Values of indicators

ω, c^{-1}	9,22	56,21	798,81
μ, c^{-1}	0,000525	0,000289	0,495

Видно, что первая собственная частота попадает в зону обычно доминирующих частот сейсмических воздействий, что может привести к возбуждению резонансных колебаний, опасных для прочности и устойчивости сооружения. Следовательно, необходимы меры для повышения частоты свободных колебаний, что можно выполнить путём увеличения жёсткости стержня, жёсткости основания под фундаментом и другими известными методами гашения колебаний.

Данные табл. 1 подтверждают известный дефект гипотезы Фойгта о линейно-вязком коэффициенте сил внутреннего трения η , состоящий в том, что он является частотно зависимым, в то время как эксперименты обнаруживают его постоянство в широком диапазоне частот (до 100). Поэтому примем его равным среднему значению для диапазона малых частот, актуальных при сейсмических колебаниях

$$\varepsilon = (\mu_1 + \mu_2)/2 = 0,000407. \quad (18)$$

Из этого следует, что в предыдущей математической модели вместо параметров диссипации η и μ должен употребляться ε . Собственные значения, найденные выше, при этом пересматриваться не будут, так как они претерпевают весьма незначительные изменения.

Далее задача состоит в том, чтобы найти собственные векторы Y_k ($k = 1, 2, 3, \dots n$) матрицы A , представляющие собственные формы колебаний. Их можно определить хорошо известными методами линейной алгебры матриц. Заметим при этом, что собственные векторы определяются с точностью до множителя.

Первые три собственные формы колебаний, нормированные к единице и полученные в среде вычислительного комплекса Matlab, даны на рис. 7.

По ним отчётливо проглядываются признаки одновременной непрерывности и дискретности данной системы.

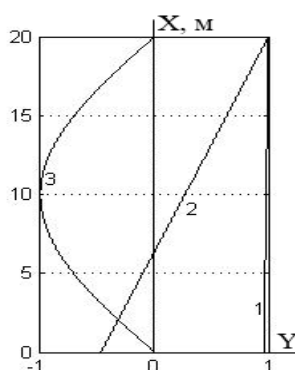


Рис.7. Собственные функции

Fig.7. Own functions

Первая и вторая формы колебаний сходны с аналогичными формами систем с двумя степенями свободы. Причина в наличии двух тяжёлых сосредоточенных масс по концам стержня. По первой форме обе массы движутся синфазно в одном направлении, почти не меняя расстояния между собой. По второй форме колебаний массы находятся в противоположных фазах движения. Третья высокая частота определяется колебаниями стальной непрерывной части системы, и форма колебаний представляется кривой, близкой к полуволне синусоиды. В этом случае концы стержня с дискретными массами остаются почти неподвижными. По-видимому, формы, диктуемые непрерывной частью стержня, будут обладать таким свойством.

Представляют интерес значения коэффициентов демпфирования μ , приведённые выше в таблице. В первом и втором случаях коэффициенты демпфирования незначительны по величине, так как при небольших частотах скорости перемещения малы и силы сопротивления, пропорциональные им, в сумме получаются также небольшими.

Почему же уменьшается второй коэффициент по сравнению с первым? Суть в том, что при второй собственной форме колебаний верхняя и нижняя части стержня имеют разные знаки деформаций и создают результирующие силы сопротивления противоположные по направлениям и частично погашающие друг друга.

В рамках данной работы ортогональность собственных форм не доказывается. Для этого потребуются специальные исследования по таким смешанным механическим системам. В то же время подобие ортогональности первой и второй форм отчётливо проглядывается по рис.7.

Также можно предположить, что более высокие формы колебаний будут диктоваться континуальной частью стержня и представляться синусоидами с последовательно увеличивающимся количеством полуволн. Основанием для такого утверждения служит известное свойство собственных форм увеличивать количество узловых точек при каждом повышении их номера.

Вывод:

1. Продольные колебания вертикальных стержней, находящихся вблизи эпицентра землетрясений, являются опасными для их прочности и устойчивости.

2. Методы конечных разностей и координатного спуска позволяют создавать универсальные алгоритмы и компьютерные программы, легко решающие сложные спектральные задачи.

3. Данную разработку можно адаптировать к колебаниям стержней переменного сечения, к колебаниям континуально-дискретных стержней.

4. До настоящего времени исследования о случайных колебаниях зданий и строительных сооружений, а также и нормативные документы посвящались горизонтальным сейсмическим воздействиям и вызванным ими поперечным изгибным колебаниям.

Между тем, приведённые здесь примеры свидетельствуют о необходимости расширения такой тематики исследований с включением и других типов колебаний: комбинаций продольных с поперечными, угловыми, крутильными, параметрическими и т.д.

Библиографический список:

1. Корчинский В.Л., Бородин Л.А. и др. Сейсмостойкое строительство зданий. М., Высшая школа, 1971. -320 с.
2. Назаров Ю.П. Расчётные параметры волновых полей сейсмических движений грунта. –М.: Наука, 2015. 374 с.
3. Бабаков И.М. Теория колебаний. М.: Наука, 1968. 560 с.
4. Культербаев Х.П. Кинематически возбуждаемые колебания континуально-дискретной многопролётной балки // Вестник Нижегородского университета им. Н.И.Лобачевского. Труды X Всероссийского съезда по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. 2011. №4, часть 2. С. 198-200.
5. Самарский А.А. Теория разностных схем. М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1977. - 656 с.
6. Вержбицкий В.М. Основы численных методов. М.: Высшая школа, 2002. 840 с.
7. Клаф З., Пензиен Дж. Динамика сооружений. М.: Стройиздат, 1979. – 320 с.
8. I.V. Kudinov, V.A. Kudinov. Mathematical simulation of the locally nonequilibrium heat transfer in a body with account for its nonlocality in space and time. Journal of Engineering Physics and Thermophysics (2015): Vol. 88, № 2, pp. 406-422.
9. Amabili, M., Nonlinear Vibrations and Stability of Shells and Plates. Cambridge University Press, New York, USA. (2008)
10. Refined beam elements with arbitrary cross-section geometries / E. Carrera, G. Giunta, P. Nali [and others] // Computers and Structures. 2010. V. 88, № 5-6. pp. 283-293.
11. Elishakoff I. Eigenvalues of Inhomogeneous Structures: Unusual Closed-form Solutions. Boca Raton, FL: CRC Press, 2005.
12. Hsu J.C., Lai H.Y., Chen C.K. Free vibration of non-uniform EulerBernoulli beams with general elastically end constraints using Adomian modified decomposition method // Journal of Sound and Vibration. 2008. V. 318. pp. 965-981.
13. Free vibration behavior of exponential functionally graded beams with varying cross-section / A.A Haasen, T. Abdelouahed, A.M. Sid [and others.] // Journal of Vibration and Control. 2011. V. 17, № 2. pp. 311-318.

14. Maurini C., Pofiri M., Pouget J. Numerical methods for modal analysis of stepped piezoelectric beams // *Journal of Sound and Vibration*. 2006. V. 298, № 4-5. pp. 918-933.
15. Zheng T. X., Ji T. J. Equivalent representations of beams with periodically variable crosssections // *Engineering Structures*. 2011. V. 33, № 3. pp. 706-719.
16. Tejada A. A Mode-Shape-Based Fault Detection Methodology for Cantilever Beams: Tech. Rep.: CR-2009-215721: NASA, 2009.
17. Alshorbagy A. E., Eltaher M. A., Mahmoud F. F. Free vibration characteristics of a functionally graded beam by finite element method // *Applied Mathematical Modelling*. 2011. V. 35, № 1. pp. 412-425.
18. Huang Y., Li X. F. A new approach for free vibration of axially functionally graded beams with non-uniform cross-section // *Journal of Sound and Vibration*. 2010. V. 329, № 11. pp. 2291-2303.
19. Mohanty S.C., Dash R.R., Rout T. Free vibration of a functionally graded rotating Timoshenko beam using FEM // *International Journal of Advanced Structural Engineering*. 2013. V. 16, № 2. pp. 405-418.
20. Ke L.L., Yang J., Kitipornchai S. An analytical study on the nonlinear vibration of functionally graded beams // *Meccanica*. 2010. V. 45, № 6. pp. 743-752.
21. Simsek M., Cansiz S. Dynamics of elastically connected doublefunctionally graded beam systems with different boundary conditions under action of a moving harmonic load // *Composite Structures*. 2012. V. 94, № 9. pp. 2861-2878.
22. Shahba A., Attarnejad R., Hajilar S. Free vibration and stability of axially functionally graded tapered Euler-Bernoulli beams // *Shock and Vibration*. 2011. V. 18. pp. 683-696.

References:

1. Korchinskiy V.L., Borodin L.A. i dr. Seysmostoykoye stroitel'stvo zdaniy. M., Vysshaya shkola, 1971. -320 s. [Korchinsky V.L., Borodin L.A. and others. Seismic construction of buildings. Moscow, High School, 1971. -320 p. (in Russ.)]
2. Nazarov YU.P. Raschotnyye parametry volnovykh poley seismicheskikh dvizheniy grunta. –M.: Nauka, 2015. 374 s. [Nazarov Yu.P. The calculated parameters of the wave fields of seismic soil movements. –M.: Science, 2015. 374 p. (in Russ.)]
3. Babakov I.M. Teoriya kolebaniy. M.: Nauka, 1968. 560 s. [Babakov I.M. Theory of oscillations. M.: Science, 1968. 560 p. (in Russ.)]
4. Kul'terbayev KH.P. Kinematicheski vzbuzhdayemyye kolebaniya kontinual'no-diskretnoy mnogoprolotnoy balki // *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I.Lobachevskogo. Trudy KH Vserossiyskogo s"yezda po fundamental'nym problemam teoreticheskoy i prikladnoy mekhaniki*. 2011. №4, chast' 2. S. 198-200. [Kulterbaev Kh.P. Kinetically excited oscillations of a continually-discrete multi-span beam // *Bulletin of Nizhny Novgorod University. N.I. Lobachevsky. Works of the X All-Russian Congress on the fundamental problems of theoretical and applied mechanics*. 2011. №4, part 2. pp. 198-200. (in Russ.)]
5. Samarskiy A.A. Teoriya raznostnykh skhem. M.: Nauka, Gl. red. fiz.-mat. lit., 1977. - 656 p. [Samarsky, A.A. The theory of difference schemes. M.: Science, Ch. ed. Phys.-Mat. lit., 1977. 656 p. (in Russ.)]
6. Verzhbitskiy V.M. Osnovy chislennykh metodov. M.: Vysshaya shkola, 2002. 840 s. [Verzhbitsky V.M. Basics of numerical methods. M.: Higher School, 2002. 840 p. (in Russ.)]
7. Klaf Z., Penziyen Dzh. Dinamika sooruzheniy. M.: Stroyizdat, 1979. – 320 s. [Clough Z., Penzien J. Dynamics of structures. M.: stroiizdat, 1979. - 320 p. (in Russ.)]
8. I.V. Kudinov, V.A. Kudinov. Mathematical simulation of the locally nonequilibrium heat transfer in a body with account for its nonlocality in space and time. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics* (2015): Vol. 88, № 2, pp. 406-422.
9. Amabili, M. *Nonlinear Vibrations and Stability of Shells and Plates*. Cambridge University Press, New York, USA. (2008)
10. Refined beam elements with arbitrary cross-section geometries / E. Carrera, G. Giunta, P. Nali [and others] // *Computers and Structures*. 2010. V. 88, № 5-6. pp. 283-293.
11. Elishakoff I. *Eigenvalues of Inhomogeneous Structures: Unusual Closed-form Solutions*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2005.
12. Hsu J.C., Lai H.Y., Chen C.K. Free vibration of non-uniform EulerBernoulli beams with general elastically end constraints using Adomian modified decomposition method // *Journal of Sound and Vibration*. 2008. V. 318. pp. 965-981.
13. Free vibration behavior of exponential functionally graded beams with varying cross-section / A.A Haasen, T. Abdelouahed, A.M. Sid [and others] // *Journal of Vibration and Control*. 2011. V. 17, № 2. pp. 311-318.
14. Maurini C., Pofiri M., Pouget J. Numerical methods for modal analysis of stepped piezoelectric beams // *Journal of Sound and Vibration*. 2006. V. 298, № 4-5. pp. 918-933.
15. Zheng T. X., Ji T. J. Equivalent representations of beams with periodically variable crosssections // *Engineering Structures*. 2011. V. 33, № 3. pp. 706-719.
16. Tejada A. A Mode-Shape-Based Fault Detection Methodology for Cantilever Beams: Tech. Rep.: CR-2009-215721: NASA, 2009.

17. Alshorbagy A. E., Eltaher M. A., Mahmoud F. F. Free vibration characteristics of a functionally graded beam by finite element method // *Applied Mathematical Modelling*. 2011. V. 35, № 1. pp. 412-425.
18. Huang Y., Li X. F. A new approach for free vibration of axially functionally graded beams with non-uniform cross-section // *Journal of Sound and Vibration*. 2010. V. 329, № 11. pp. 2291-2303.
19. Mohanty S.C., Dash R.R., Rout T. Free vibration of a functionally graded rotating Timoshenko beam using FEM // *International Journal of Advanced Structural Engineering*. 2013. V. 16, № 2. pp. 405-418.
20. Ke L.L., Yang J., Kitipornchai S. An analytical study on the nonlinear vibration of functionally graded beams // *Meccanica*. 2010. V. 45, № 6. pp. 743-752.
21. Simsek M., Cansiz S. Dynamics of elastically connected doublefunctionally graded beam systems with different boundary conditions under action of a moving harmonic load // *Composite Structures*. 2012. V. 94, № 9. pp. 2861-2878.
22. Shahba A., Attarnejad R., Hajilar S. Free vibration and stability of axially functionally graded tapered Euler-Bernoulli beams // *Shock and Vibration*. 2011. V. 18. pp. 683-696.

Сведения об авторах:

Культербаев Хусен Пшимурзович - доктор технических наук, профессор кафедры «Строительные конструкции и механика».

Абдул-Салам Игаб Мазен – магистрант.

Пайзулаев Магомед Муртазалиевич - кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой сопротивления материалов, теоретической и строительной механики.

Information about the authors.

Husen P. Kulterbaev –Dr. Sci. (Technical), Prof., Department of Building construction and mechanics.

Abdul-Salam Igab Mazen – undergraduate.

Magomed M. Payzulaev – Cand. Sci. (Technical), As. Prof., Head of the Department Resistance of Materials, Theoretical and Construction Mechanics.

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию 10.05.2018.

Принята в печать 30.08.2018.

Conflict of interest.

Received 10.05.2018.

Accepted for publication 30.08.2018.

Для цитирования: Ратманова О.В., Шляхин Д.А. Подбор геометрических характеристик для круглых многослойных пьезокерамических пластин. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2018; 45(3): 18-28. DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-3-18-28

For citation: Ratmanova O.V., Shlyakhin D.A. The selection of geometric characteristics for circular multi-layered piezoelectric plates. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2018; 45 (3): 18-28. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-3-18-28

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ МЕХАНИКА

УДК 539.3

DOI: 10.21822/2073-6185-2018-45-3-18-28

ПОДБОР ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЛЯ КРУГЛЫХ МНОГОСЛОЙНЫХ ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИХ ПЛАСТИН

Ратманова О.В.², Шляхин Д.А.¹

Самарский государственный технический университет,
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, Россия,

¹e-mail: d-612-mit2009@yandex.ru, ²e-mail: olesya654@yandex.ru

Резюме. Цель. Для наиболее эффективного преобразования электрической энергии в механические колебания возникает необходимость углубленного анализа связанности физических полей различной природы в многослойных конструкциях. **Метод.** Решение осуществляется методом конечных интегральных преобразований, используя последовательно преобразование Фурье–Бесселя по радиальной координате r и обобщенное преобразование по аксиальной переменной z . При этом каждый раз предварительно выполняется процедура стандартизации (приведение граничных условий к виду, позволяющему применить соответствующее преобразование). **Результат.** Разработана математическая модель расчета биморфных пластин. Рассмотрены многослойные сплошные жестко и шарнирно закрепленные конструкции, в работе которых используется принцип обратного пьезоэффекта. Построены замкнутые решения нестационарных осесимметричных задач теории электроупругости для многослойных конструкций методом конечных интегральных преобразований. На основании анализа численных результатов расчета, представлены практические рекомендации по проектированию пьезокерамических преобразователей резонансного и нерезонансного классов. Разработан алгоритм оптимизации работы рассматриваемых конструкций путем подбора их геометрических размеров и используемого материала, позволяющий наиболее эффективно преобразовать приложенную электрическую нагрузку в механические перемещения. **Вывод.** Представленные результаты дают возможность уточнить допущения о характере распределения электрического поля, которые необходимо использовать при проектировании биморфных конструкций других конфигураций, расчет которых возможен только с помощью прикладных теорий для тонких пластин.

Ключевые слова: биморфная пьезокерамическая пластина, нестационарная осесимметричная задача, конечные интегральные преобразования

PHYSICAL-MATEMATICAL SCIENCE
MECHANICS

THE SELECTION OF GEOMETRIC CHARACTERISTICS FOR CIRCULAR MULTI-LAYERED PIEZOELECTRIC PLATES

Olesya V. Ratmanova², Dmitiy A. Shlyakhin¹

State Technical University,

244 Molodogvardeyskaya Str., Samara 443100, Russia,

¹e-mail: d-612-mit2009@yandex.ru, ²e-mail: olesya654@yandex.ru

Abstract Objectives For the most efficient conversion of electrical energy into mechanical vibrations, there is a need for an in-depth analysis of the connectivity of physical fields of different nature in multilayer structures. **Method.** The solution is carried out by the method of finite integral transforms, using successively the Fourier – Bessel transform along the radial coordinate and the generalized transform along the axial variable. In this case, each time the standardization procedure is preliminarily performed (reduction of the boundary conditions to a form, which allows to apply the corresponding transformation). **Result.** A mathematical model for the calculation of bimorphic plates is developed. Multi-layer solid rigid and hinged structures are considered, in which the principle of reverse piezoelectric effect is used. Closed solutions of non-stationary axisymmetric problems of the electroelasticity theory for multilayer structures by the method of finite integral transformations are constructed. Based on the analysis of the numerical results of the calculation, practical recommendations for the design of piezoceramic transducers of resonance and nonresonance classes are presented. An algorithm has been developed for optimizing the operation of the structures under consideration by selecting their geometrical dimensions and the material used, which makes it possible to most effectively convert the applied electrical load into mechanical displacements. **Conclusion.** The presented results make it possible to clarify the assumptions about the nature of the distribution of the electric field, which should be used when designing bimorph structures of other configurations, which can only be calculated using applied theories for thin plates.

Keywords: bimorph piezoceramic plate, nonstationary axisymmetric problem, finite integral transformations

Введение. В различных технических устройствах широко используются пьезокерамические преобразователи в виде тонких биморфных пластин [1–5]. Данные конструкции представляют собой симметричные или асимметричные многослойные системы, состоящие из электроупругих и упругих тонких элементов. Изгибные колебаний, в случае использования явления обратного пьезоэффекта, создаются с помощью электрического напряжения, приложенного на электродированные поверхности пьезокерамических пластин. Для наиболее эффективного преобразования электрической энергии в механические колебания возникает необходимость углубленного анализа связанности физических полей различной природы в многослойных конструкциях.

Для решения данной проблемы используется теории электроупругости в пространственной постановке [6,7], математическая постановка которых включает сложные расчетных соотношений в частных производных. Для их реализации, как правило, используются прикладные теории, в которых применяются различные кинематические гипотезы и допущения о характере распределения напряженности электрического поля в пьезокерамических пластинах [8–14].

В настоящей работе, на основании представленного алгоритма расчета нестационарных осесимметричных задач для шарнирно и жестко закрепленных сплошных биморфных пластин в трехмерной постановке (без использования упрощений), а также анализа численных результатов, разработаны практические рекомендации по оптимизации работы рассматриваемых конструкций. Кроме того, для пластин имеющих другое конструктивное решения, работу которых можно исследовать только с помощью прикладных теорий, сформулированы законы изменения электрического поля.

Постановка задачи. В общем случае круглая биморфная конструкция, занимающая в цилиндрической системе координат (r_*, θ, z_*) область $\Omega: \{0 \leq r \leq b, 0 \leq \theta \leq 2\pi, 0 \leq z_* \leq h^*\}$, представляет многослойную систему в виде жестко соединенных между собой электроупругих (пьезокерамических) и упругих тонких пластин. Для определенности рассмотрим два конструктивных решения (рисунок 1, а, б): 1) электроупругая система состоит из двух пьезокерамических пластин высотой h_1^* ($h^* = 2h_1^*$); 2) конструкция включает металлическую подложку толщиной h_2^* и две пьезокерамические пластины ($h^* = 2h_1^* + h_2^*$).

Изгибные осесимметричные колебания конструкций индуцируются в результате подведения к торцевым электродированным поверхностям пьезокерамических пластин, выполненных из материала гексагональной системы класса 6 mm [15] с параллельным направлением вектора аксиальной поляризации, электрического напряжения $V^*(r_*, t_*)$. Рассматриваются случаи жесткого и шарнирного закрепления цилиндрической поверхности электроупругих систем.

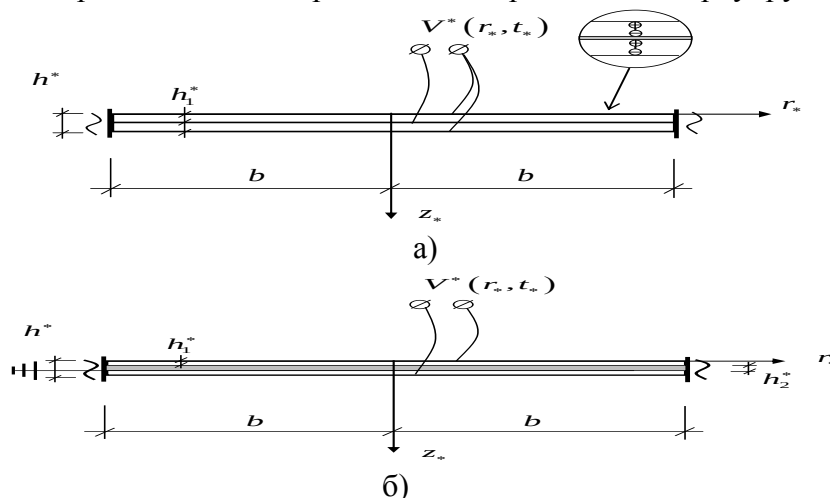


Рис. 1. Расчетная схема биморфных пластин
 Fig. 1. Design scheme of bimorph plates

Математическая формулировка рассматриваемых начально – краевых задач в безразмерной форме включает [7]:

– систему линейных осесимметричных дифференциальных уравнений движения и электростатики относительно компонент вектора перемещений U, W , а также потенциала электрического поля ϕ :

$$L_{pm} \bar{N}(r, z, t) = 0 \quad (p, m = \overline{1, 3}); \quad (1)$$

– механические и электрические граничные условия:

$$r = 0, 1 \quad W(0, z, t) < \infty, \quad U(0, z, t) < \infty, \quad \phi(0, z, t) < \infty, \quad (2)$$

$$W(1, z, t) = 0, \quad D_{r|r=1} = 0,$$

$$\text{жесткое закрепление:} \quad U(1, z, t) = 0; \quad (3)$$

$$\text{шарнирное закрепление:} \quad \sigma_{rr}(1, z, t) = 0; \quad (4)$$

$$z = 0, h \quad \sigma_{zz} = \sigma_{rz} = 0, \quad (5)$$

$$\text{конструктивное решение 1 (рис.1,а):} \quad \phi = V(r, t) / 2,$$

$$\text{конструктивное решение 2 (рис.1,б):} \quad \phi = \pm V(r, t) / 2;$$

$$z = h_1, h_1 + h_2 \quad \sigma_{zz}(z+0) = \sigma_{zz}(z-0), \quad \sigma_{rz}(z+0) = \sigma_{rz}(z-0), \quad (6)$$

$$W(z+0) = W(z-0), \quad U(z+0) = U(z-0),$$

$$\text{конструктивное решение 1 (рис.1,а):} \quad \phi(h_1, z, t) = -V(r, t) / 2,$$

$$\text{конструктивное решение 2 (рис.1,б):} \quad \phi = 0;$$

– начальные условия:

$$t = 0 \quad U(r, z, 0) = W(r, z, 0) = 0, \quad \frac{\partial U(r, z, t)}{\partial t} \Big|_{t=0} = \frac{\partial W(r, z, t)}{\partial t} \Big|_{t=0} = 0; \quad (7)$$

где L_{pm} – дифференциальные операторы в частных производных, $t = t_* b^{-1} \sqrt{C_{11}^{(1)} / \rho^{(1)}}$,

$$\bar{N}(r, z, t) = [U(r, z, t), W(r, z, t), \phi(r, z, t)]^T, \quad [U, W, h, r, z] = [U^*, W^*, h^*, r_*, z_*] / b,$$

$$[\phi, V] = [\phi^*, V^*] e_{33} / (C_{11}^{(1)} b), \quad U^*, W^*, \phi^* \text{ – компоненты вектора перемещений и потенциал элект-}$$

рического поля в размерной форме, σ_{pk} – компоненты тензора напряжений ($p, k = r, z$), D_r – радиальная компонента вектора индукции электрического поля, $C_{11}^{(1)}, \rho^{(1)}$ – модуль упругости и плотность анизотропного пьезокерамического материала.

Следует отметить, что при исследовании упругой среды (рис.1,б) система (1) состоит только из уравнений движения, сформулированных относительно компонент вектора перемещений, а при формировании соотношений (6) для первого конструктивного решения (рис.1,а) условия совместности механических напряжений и перемещений при $z = h_1 + h_2$ отсутствуют.

Методы исследования. Построение общего замкнутого решения. Решение осуществляется методом конечных интегральных преобразований, используя последовательно преобразование Фурье–Бесселя [16] по радиальной координате r и обобщенное преобразование [17] по аксиальной переменной z . При этом каждый раз предварительно выполняется процедура стандартизации [18] (приведение граничных условий к виду, позволяющему применить соответствующее преобразование). Трансформанты $\bar{R}(n, z, t)$, $G(\lambda_{in}, n, t)$ и формулы обращения соответствующих преобразований имеют вид:

$$\bar{R}(n, z, t) = \int_0^1 \bar{N}(r, z, t) \bar{P}(n, r) r dr$$

$$\bar{N}^* = \sum_{n=0}^{\infty} \Omega_n^{-1} \bar{P} \bar{R} \quad (8)$$

$$G(\lambda_{in}, n, t) = \int_k^h \bar{Y}(\lambda_{in}, z) \bar{R}^*(n, z, t) dz,$$

$$\bar{R}^* = \sum_{i=1}^{\infty} G \bar{K} \|K_{in}\|^{-2}, \quad (9)$$

где $\bar{P} = [a_{mp}]$ – диагональная матрица 3-го порядка ($a_{11} = J_1(j_n r)$, $a_{22} = a_{33} = J_0(j_n r)$), j_n – положительные нули функций $J_1(j_n)$ при жестком и $J_0(j_n)$ шарнирном закреплении ($n = 0, 1, 2, \dots$), $\bar{R} = \bar{H}_k + \bar{R}^*$, H_k – трехкомпонентная ($k = 1, 2, 3$) стандартизирующая вектор – функции, $\bar{Y} = [K_1, K_2, 0]$, $\bar{K} = [K_1, K_2, K_3]^T$, λ_{in} – положительные параметры, образующие счетное множество ($i = 1, 2, 3, \dots$); $\Omega_n \|K_{in}\|^2$ – квадрат нормы ядра преобразований. В результате получаем расчетные соотношения для функций U, W, ϕ в виде спектральных разложений по найденной системе собственных функций $K_1 \div K_3$, которыми являются линейные комбинации обычных и модифицированных функций Бесселя:

$$\bar{N}(r, z, t) = \sum_{n=0}^{\infty} \Omega_n^{-1} \bar{P}(n, r) \left[\bar{H}_k + \sum_{i=1}^{\infty} G(\lambda_{in}, n, t) \bar{K}(\lambda_{in}, r) \|K_{in}\|^{-2} \right]. \quad (10)$$

Круговые частоты осесимметричных колебаний цилиндра ω_{in} связаны с λ_{in} зависимостью $\omega_{in} = \frac{\lambda_{in}}{b} \sqrt{\frac{C_{11}^{(1)}}{\rho^{(1)}}}$.

Алгоритм решения начально–краевых задач (1–7) подробно описан в работах авторов [19,20].

Обсуждение результатов. На основании представленного алгоритма и разработанного программного комплекса получены численные результаты расчета, которые позволяют путем подбора геометрических размеров и материала рассматриваемых конструкций, оптимизировать их работу, т.е. добиться наиболее эффективного преобразования приложенной электрической нагрузки в механические перемещения.

В качестве первого примера рассматривается жесткозакрепленная биморфная конструкция ($b = 14 \times 10^{-3}$ м), состоящая из двух пьезокерамических пластин состава ЦТС–19 (рис.1,а) и имеющая следующие физические характеристики материала:

$$\{e_{31}, e_{33}, e_{15}\} = \{-4.9, 14.9, 10.6\} \text{ Кл/м}^2, \quad \{\varepsilon_{11}, \varepsilon_{33}\} = \{7.73, 7.26\} \times 10^{-9} \text{ Ф/м}, \quad \rho = 7730 \text{ кг/м}^3, \\ \{C_{11}^{(1)}, C_{33}^{(1)}, C_{12}^{(1)}, C_{13}^{(1)}, C_{55}^{(1)}\} = \{10.9, 9.1, 6.1, 5.4, 2.4\} \times 10^{10} \text{ Н/м}^2.$$

Численные результаты расчета дают возможность сделать следующие выводы:

1. Для наиболее эффективного преобразования внешнего электрического воздействия в механические колебания на торцевых электродированных поверхностях пьезокерамических пластин необходимо использовать систему разрезных кольцевых электродов (количество и размеры электродов определяют нулевые значения функции $J_1(j_n)$) с подключением соседних электродов в противофазе.

Причем при сплошном электродном покрытии механические колебания в жесткозакрепленной конструкции не возбуждаются.

На основании данного вывода анализ напряженно–деформированного состояния и электрического поля биморфной пластины, работающей на первой резонансной частоте, проводится при использовании двух электродов на торцевых поверхностях с радиусом раздела $a = 8.8 \times 10^{-3}$ м ($R_1 = a/b = 0.628$).

Для этого представляем электрическую нагрузку $V(r, t)$ в виде $V(r, t) = V_0 [H(R_1 - r) - H(r - R_1)] \sin \beta t$,

где V_0 – амплитудное значение интенсивности в безразмерной форме, β – относительная частота вынужденных колебаний ($\beta = \beta^* b \sqrt{\rho^{(1)} / C_{11}^{(1)}}$, β^* – круговая частота вынужденных колебаний);

2. При проектировании изгибных преобразователей необходимо учитывать, что один из способов повышения чувствительности прибора является уменьшение его толщины. Это приводит к снижению жесткости конструкции и увеличению амплитудных значений вертикальных перемещений.

Однако в этом случае наблюдается увеличение аксиальной компоненты векторов напряженности $E_z(r, z, t)$ и индукции $D_z(r, z, t)$ электрического поля (рис. 2, а, б).

Данный факт необходимо учитывать, поскольку при больших значениях $E_z(r, z, t)$ происходит деполяризация пьезокерамического материала.

В частности, образование в пьезокерамическом материале состава ЦТС–19 напряженности электрического поля более 300 кВ/м приводит к снижению численных значений коэффициентов диэлектрической проницаемости и пьезомодулей. В рассматриваемой системе оптимальная толщина $h_1^* = 0.2 \times 10^{-3}$ м ($V_0^* = 20$ В);

3. Сравнение численных значений аксиальной (рис.2) и радиальной (рис.3) компонент электрического поля позволяют сделать вывод, что при расчете пьезокерамических пластин с помощью прикладных теорий радиальными составляющими можно пренебречь, поскольку их численные значения существенно меньше соответствующих аксиальных величин.

Кроме того, принимая во внимание, что в пределах электрода, аксиальная компонента напряженности по радиальной координате практически не меняется, на основании полученных результатов, можно для расчета сформулировать гипотезу о характере изменения напряженности электрического поля в виде простой зависимости $E_z(r, z, t) = E_z(z, t) = \pm \frac{f(z)}{h_1^*} V(t)$ ($f(z)$ –

многочлен, аппроксимирующий соответствующую функцию (рис.2, график 1)).

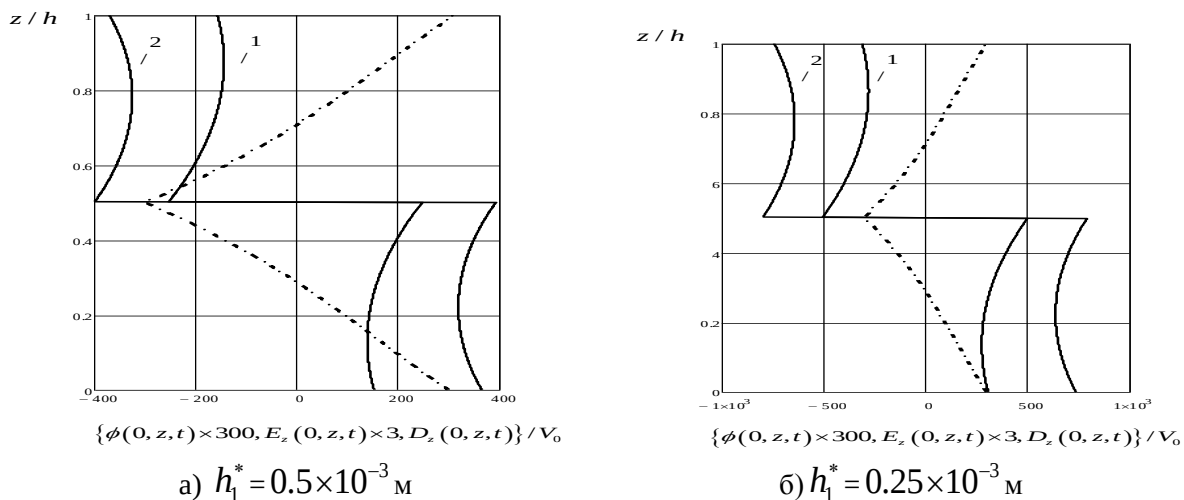


Рис.2. Графики изменения амплитудных значений $\phi(r, z, t)$, $E_z(r, z, t)$, $D_z(r, z, t)$ по высоте биморфной пластины при $\beta = 0.8\lambda_{11}$ (1– E_z , 2– D_z , пунктирная линия – ϕ , λ_{11} – собственное значение, соответствующее первой частоте собственных осесимметричных колебаний)

Fig.2. Graphs of amplitude values $\phi(r, z, t)$, $E_z(r, z, t)$, $D_z(r, z, t)$, the height of the bimorph plate at $\beta = 0.8\lambda_{11}$ (1– E_z , 2– D_z , dashed line– ϕ , λ_{11} – eigenvalue corresponding to the first frequency of its own axisymmetric oscillations)

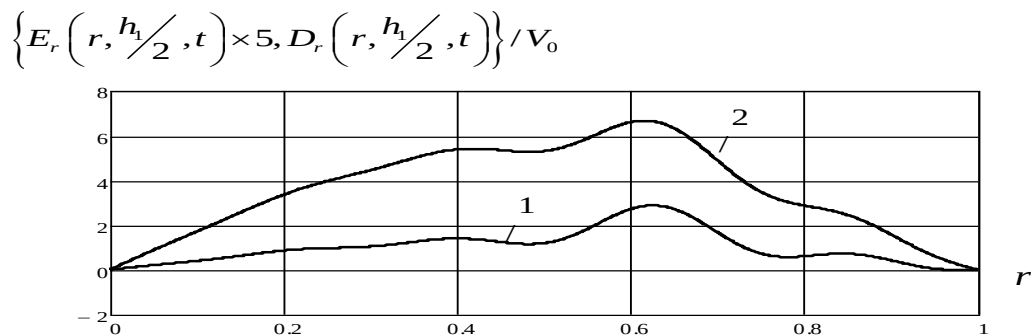


Рис.3. Графики изменения амплитудных значений радиальных компонент вектора электрического поля по радиальной координате: 1– E_r , 2– D_r ($h_1^* = 0.5 \times 10^{-3}$ м)

Fig.3. Graphs of the amplitude values of the radial components of the electric field vector along the radial coordinate: 1– E_r , 2– D_r ($h_1^* = 0.5 \times 10^{-3}$ м)

В качестве следующего примера рассматривается шарнирно закрепленная биморфная конструкция (рис.1, б), состоящая из металлической подложки и двух пьезокерамических пластин состава ЦТС–19. При этом подложка ($h_2^* = 10^{-3}$ м) изготавливается из различных сплавов (дюралюминий – $\nu = 0.34$, $E = 7.3 \times 10^{10}$ Н/м², $\rho = 2800$ кг/м³; латунь – $\nu = 0.35$, $E = 9.8 \times 10^{10}$ Н/м², $\rho = 8600$ кг/м³; E, ν, ρ – модуль упругости, коэффициент Пуассона и плотность изотропного материала).

Данное конструктивное решение позволяет повысить прочностные свойства многослойной электроупругой системы, поскольку пьезокерамика является хрупким материалом.

Здесь принимается во внимание выражения для модулей упругости металлической подложки:

$$C_{11}^{(2)} = C_{33}^{(2)} = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}, \quad C_{12}^{(2)} = C_{13}^{(2)} = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}, \quad C_{55}^{(2)} = \frac{E}{2(1+\nu)}.$$

Рассматривается работа электроупругой системы также на первой резонансной частоте. В этом случае для наиболее эффективного преобразования внешнего электрического воздействия на лицевых поверхностях конструкции используется сплошное электродное покрытие. Поэтому электрическая гармоническая нагрузка $V(r, t)$ представляется в виде:

$$V(r, t) = V_0 \sin \beta t.$$

На рис. 4 – 7 изображены графики, характеризующие изменение по пространственным координатам и времени составляющих механических и электрических полей напряжений ($\beta = 0.8\lambda_{11}$).

На основании анализа результатов расчета можно сделать следующие выводы:

- 1) При заданных геометрических размерах конструкции физические характеристики материала подложки оказывают влияние на частотный спектр собственных колебаний (табл.1) и практически не оказывают влияние на амплитудные значения вектора перемещений. На рис. 4 пунктирной линией обозначены результаты расчета при использовании в качестве материала подложки латунь, а сплошной – дюралюминий;
- 2) Графики изменения амплитудных значений нормальных напряжений $\sigma_{rr}(r, z, t)$ по радиальной координате показывают, что при шарнирном закреплении пластины максимальные значения наблюдаются в центре пластины при $z = 0, h$ (рис.5). При этом в области соединения двух элементов с разными физическими характеристиками присутствует разное значение напряжений;
- 3) Анализ графиков « $U(r, z, t) - z$ », представленных на рисунке 6, показывает, что гипотезу плоских сечений, применяемую в прикладной теории для тонких систем, можно использовать также при исследовании составных тонких пластин, имеющих различные физические характеристики по высоте сечения;
- 4) Амплитудные значения вектора напряженности электрического поля $E_z(r, z, t)$ по толщине пьезокерамической пластины изменяется по линейной зависимости и данный характер не зависит от радиальной координаты. На рис. 7 цифрами 1,2,3 обозначены результаты при $r = 0, 0.4, 0.8$. Причем, наибольшие значения $E_z(r, z, t)$ наблюдаются в области соединения металлической и пьезокерамической пластин ($z = h_1, h_1 + h_2$);
- 5) На основании полученных результатов, аналогично предыдущему примеру, можно сформулировать гипотезу о характере изменения напряженности электрического поля. При этом функция $f(z)$ является линейной (рис.7).

Таблица 1. Частотный спектр собственных колебаний
Table 1. Frequency spectrum of natural oscillations

	Дюралюминий			Латунь		
	λ_{11}	λ_{12}	λ_{13}	λ_{11}	λ_{12}	λ_{13}
$h_1^* = 0.2 \times 10^{-3}, \text{м}$	0.057	0.296	0.716	0.059	0.312	0.756
$h_1^* = 0.5 \times 10^{-3}, \text{м}$	0.072	0.373	0.888	0.082	0.427	1.020

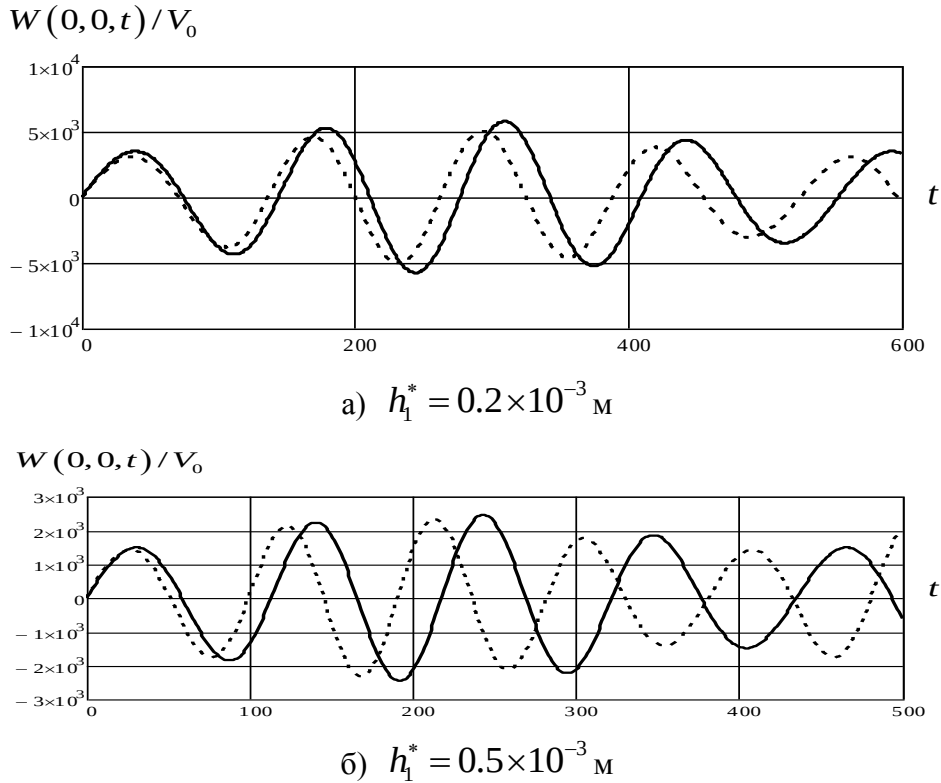


Рис.4. Графики изменения $W(0,0,t)$ во времени t (сплошная линия – подложка из дюралюминия, пунктирная – из латуни)

Fig.4. Graphs of change $W(0,0,t)$ over time t (solid line - duralumin substrate, dotted - from brass)

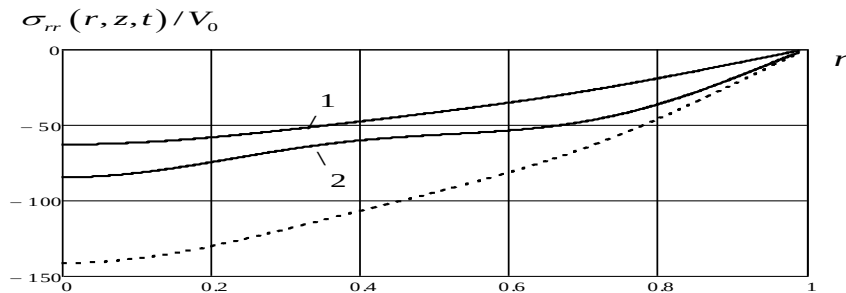


Рис.5. Графики изменения амплитудных значений нормальных напряжений $\sigma_{rr}(r,z,t)/V_0$ по радиальной координате (1– $z = h_1 - 0$, 2– $z = h_1 + 0$, пунктирная – $z = 0$)

Fig.5. Graphs of amplitude values of normal stress along $\sigma_{rr}(r,z,t)/V_0$ the radial coordinate ((1– $z = h_1 - 0$, 2– $z = h_1 + 0$, dashed - $z = 0$))

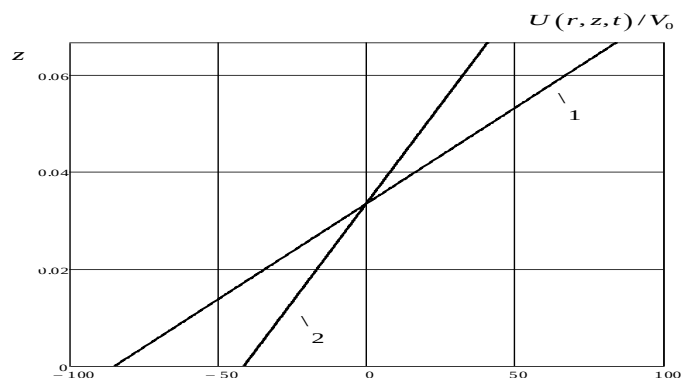
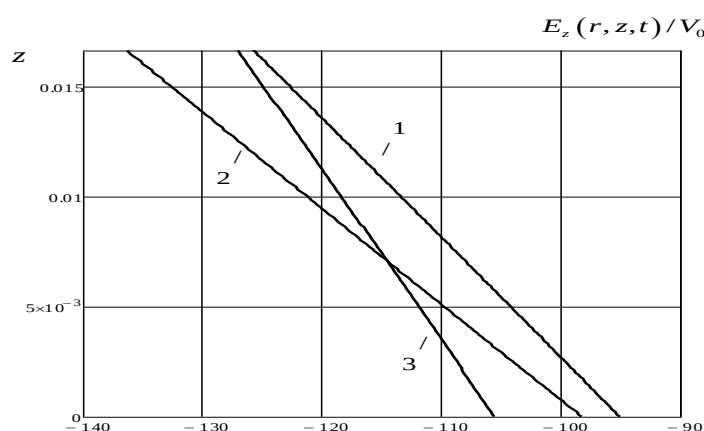


Рис.6. Графики изменения амплитудных значений радиальной компоненты вектора перемещений $U(r, z, t)$ по высоте пластины (1– $r = 1$, 2– $r = 0.3$)

Fig.6. Graphs of the amplitude values of the radial component of the displacement vector along $U(r, z, t)$



the plate height (1– $r = 1$, 2– $r = 0.3$)

Рис.7. Изменения амплитудных значений аксиальной компоненты напряженности $E_z(r, z, t)$ по высоте пластины (1– $r = 0$, 2– $r = 0.4$, 3– $r = 0.8$)

Fig.7. Changes in the amplitude values of the axial component of tension along $E_z(r, z, t)$ the plate height (1– $r = 0$, 2– $r = 0.4$, 3– $r = 0.8$)

Вывод. При действии гармонической электрической нагрузки использование допущения об установившемся режиме вынужденных колебаний, применяемое при исследовании большинства подобных динамических задач, можно применять, когда частота вынужденных колебаний существенно меньше первой моды собственных колебаний. При высокочастотном внешнем воздействии, вследствие наложения отраженных волн деформирования, наблюдается более сложная зависимость (рис. 4) и в этом случае необходимо использовать построенный авторами алгоритм расчета.

Библиографический список:

1. Подводные электроакустические преобразователи. Справочник/ Под ред. В.В. Богородского. – Л.: Судостроение, 1983. –248 с.
2. Sharapov V. Piezoceramic sensors. –Springer Verlag, 2010. – 498 p.
3. Джагуров Р.Г. Пьезоэлектронные устройства вычислительной техники, систем контроля и управления. СПб.: Политехника, 1994. 608 с.
4. Домаркас В.И., Кажис Р-И.Ю. Контрольно-измерительные пьезоэлектрические преобразователи. Вильнюс: Минтис, 1975. 255 с.
5. Gabbert U., Tzou H.S. Smart Structures and Structronic Systems. London, Kluwer Academic Pub, 2001, 384 p.
6. Новожилов Ю.В. Электродинамика/ Ю.В. Новожилов, Ю.А. Яппа. –М.: Наука, 1978, –352с.

7. Гринченко В.Т., Улитко А.Ф., Шульга Н.А. Механика связанных полей в элементах конструкций. Киев: Наук. думка, 1989. 279 с.
8. V. Tsaplev, R. Konovalov, K. Abbakumov. Disk bimorph-type piezoelectric energy harvester, J. of Power and Energy Eng. №3(2015) pp. 63-68.
9. Smits J.G., Dalke S.I., Cooney T.K., The constituent equations of piezoelectric bimorphs// Sensors and Actuators A, 1991, no.28, pp. 41–61.
10. Ватульян А.О. Об одной модели изгибных колебаний пьезоэлектрических биморфов с разрезными электродами и ее приложение // Изв. РАН. МТТ, 2007, №4. С.114–122.
11. Tsaplev V., Konovalov R., Abbakumov, K. Disk Bimorph-Type Piezoelectric Energy Harvester// Journal of Power and Energy Engineering, 2015, no. 3, pp. 63-68. doi: org/10.4236/jpee.2015. 34010.
12. Петрищев О. Н. и др. Исследование параметров динамического напряженно–деформированного состояния асимметричных биморфных пьезокерамических элементов// Вісник ЧДТУ, 2013, №4. С. 38-48.
13. Янчевский И.В. Минимизация прогибов электроупругой биморфной пластины при импульсном нагружении // Проблемы вычислительной механики и прочности конструкций. Харьков, 2011, вып. 16. С. 303–313.
14. Шляхин Д.А. Вынужденные осесимметричные колебания пьезокерамической тонкой биморфной пластины // Изв. РАН. МТТ, 2013, №2. С.77 –85.
15. Бардзокас Д.И. Распространение волн в электроупругих средах/ Д.И. Бардзокас, Б.А. Кудрявцев, Н.А. Сеник. – М.: Комкига, 2003. –336 с.
16. Снеддон И.Н. Преобразования Фурье/ И. Н. Снеддон. –М.: Изд-во иностр. лит., 1955. –668 с.
17. Сеницкий Ю.Э. Исследование упругого деформирования элементов конструкций при динамических воздействиях методом конечных интегральных преобразований/ Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1985. 174 с.
18. Шляхин Д.А. Вынужденные осесимметричные изгибные колебания толстой круглой жестко закрепленной пластины// Вестник Самарск. гос. ун-та. Естественнонаучн. серия. 2011, №8(89). С.142–152.
19. Shlyakhin D. A., Kazakova O.V. A dynamic axially symmetric goal and its extended solution for a fixed rigid circular multi-layer plate// Procedia Engineering (2016) Volume 153, pp. 662-666 DOI information: 10.1016/j.proeng.2016.08.219.
20. Шляхин Д.А. Уточненное решение динамической задачи электроупругости для биморфной пластины// Вестник КРСУ. 2016. Том 16. №5. С.108-113.

References:

1. Podvodnyye elektroakusticheskiye preobrazovateli. Spravochnik/ Pod red. V.V. Bogorodskogo. – L.: Sudostroyeniye, 1983. –248 s. [Underwater electroacoustic transducers. Handbook / Ed. V.V. Bogorodsky. - L.: Shipbuilding, 1983. –248 p. (in Russ)]
2. Sharapov V. Piezoceramic sensors. –Springer Verlag, 2010. – 498 p.
3. Dzhagurov R.G. P'yezoelektronnyye ustroystva vychislitel'noy tekhniki, sistem kontrolya i upravle-niya. SPb.: Politekhnik, 1994. 608 s. [Dzhagurov R.G. Piezoelectronic devices of computer technology, control systems and control. SPb.: Polytechnic, 1994. 608 p. (in Russ)]
4. Domarkas V.I., Kazhis R-I.YU. Kontrol'no-izmeritel'nyye p'yezoelektricheskiye preobrazovateli. Vil'nyus: Mintis, 1975. 255 s. [Domarkas, VI, Kazhis R-I.Yu. Piezoelectric transducers. Vilnius: Minthis, 1975. 255 p. (in Russ)]
5. Gabbert U., Tzou H.S. Smart Structures and Structronic Systems. London, Kluwer Academic Pub, 2001, 384 p.
6. Novozhilov YU.V. Elektrodinamika/ YU.V. Novozhilov, YU.A. Yappa. –M.: Nauka, 1978, –352s. [Novozhilov Yu.V. Electrodynamics / Yu.V. Novozhilov, Yu.A. Yappa –M.: Science, 1978, –352c. (in Russ)]
7. Grinchenko V.T., Ulitko A.F., Shul'ga N.A. Mekhanika svyazannykh poley v elementakh konstruktсий. Kiyev: Nauk. dumka, 1989. 279 s. [Grinchenko V.T., Ulitko A.F., Shulga N.A. Mechanics of related fields in structural elements. Kiev: Sciences. Dumka, 1989. 279 s. (in Russ)]
8. V. Tsaplev, R. Konovalov, K. Abbakumov. Disk bimorph-type piezoelectric energy harvester, J. of Power and Energy Eng. №3(2015) rr. 63-68.
9. Smits J.G., Dalke S.I., Cooney T.K., The constituent equations of piezoelectric bimorphs// Sensors and Actuators A, 1991, no.28, pp. 41–61.
10. Vatul'yan A.O. Ob odnoy modeli izgibnykh kolebaniy p'yezoelektricheskikh bimorfov s razreznymi elektrodami i yeye prilozheniye // Izv. RAN. MTT, 2007, №4. S.114–122. [Vatulyan A.O. On a Model of Flexural Oscillations of Piezoelectric Bimorphs with Split Electrodes and its Application, Izv. RAS. MTT, 2007, №4. P.114-122. (in Russ)]
11. Tsaplev V., Konovalov R., Abbakumov, K. Disk Bimorph-Type Piezoelectric Energy Harvester// Journal of Power and Energy Engineering, 2015, no. 3, pp. 63-68. doi: org/10.4236/jpee.2015. 34010.
12. Petrishchev O. N. i dr. Issledovaniye parametrov dinamicheskogo napryazhenno–deformirovannogo so-stoyaniya asimmetrichnykh bimorfnykh p'yezokeramicheskikh elementov// Visnik CHDTU, 2013, №4. С. 38-48. [Petrishchev O.N., et al. Investigation of the parameters of the dynamic stress – strain state of asymmetric bimorph piezoceramic elements // Visnyk CHDTU, 2013, No.4. С. 38-48. (in Russ)]
13. Yanchevskiy I.V. Minimimizatsiya progibov elektrouprugoy bimorfnoy plastiny pri impul'snom nagruzhenii // Problemy vychislitel'noy mekhaniki i prochnosti konstruktсий. Khar'kov, 2011, vyp. 16. S. 303–313. [Yanchevsky

- I.V. Minimizing the deflections of an electroelastic bimorph plate under pulsed loading // Problems of computational mechanics and structural strength. Kharkov, 2011, no. 16. pp. 303–313. (in Russ)]
14. Shlyakhin D.A. Vynuzhennyye osesimmetrichnyye kolebaniya p'yezokeramicheskoy tonkoy bimorfnoy plastiny // Izv. RAN. MTT, 2013, №2. S.77 –85. [Shlyakhin D.A. Forced axisymmetric oscillations of a piezoceramic thin bimorph plate // Izv. RAS. MTT, 2013, №2. P.77 –85. (in Russ)]
 15. Bardzokas D.I. Rasprostraneniye voln v elektrouprugikh sredakh/ D.I. Bardzokas, B.A. Kudryavtsev, N.A. Senik. – M.: Komkniga, 2003. –336 s. [Bardzokas D.I. Wave propagation in electro-elastic media / D.I. Bardzokas, B.A. Kudryavtsev, N.A. Senik. – M.: Combook, 2003. –336 p. (in Russ)]
 16. Sneddon I.N. Preobrazovaniya Fur'ye/ I. N. Sneddon. –M.: Izd-vo inostr. lit., 1955. –668 s. [Sneddon I.N. Fourier transforms / I.N. Sneddon. –M.: Publishing house inostr. Lit., 1955. –668 p. (in Russ)]
 17. Senitskiy YU.E. Issledovaniye uprugogo deformirovaniya elementov konstruktsiy pri dinamicheskikh vozdeystviyakh metodom konechnykh integral'nykh preobrazovaniy/ Saratov: Izd-vo Sarat. un-ta, 1985. 174 s. [Senitskiy Yu.E. Investigation of elastic deformation of structural elements under dynamic actions by the method of finite integral transformations / Saratov: Sarat Publishing House. Un – one, 1985. 174 s. (in Russ)]
 18. Shlyakhin D.A. Vynuzhennyye osesimmetrichnyye izgibnyye kolebaniya tolstoy krugloy zhestko zakrep-lennoy plastiny// Vestnik Samarsk. gos. un-ta. Yestestvennonauchn. seriya. 2011, №8(89). S.142–152. [Shlyakhin D.A. Forced axisymmetric bending vibrations of a thick round rigidly fixed plate. Vestnik Samarsk. state un – one Natural Science series. 2011, No. 8 (89). Pp. 142–152. (in Russ)]
 19. Shlyakhin D. A., Kazakova O.V. A dynamic axially symmetric goal and its extended solution for a fixed rigid circular multi-layer plate// Procedia Engineering (2016) Volume 153, pp. 662-666 DOI information: 10.1016/j.pro-eng.2016.08.219.
 20. Shlyakhin D.A. Utochnennoye resheniye dinamicheskoy zadachi elektrouprugosti dlya bimorfnoy plasti-ny// Vestnik KRSU. 2016. Tom 16. №5. S.108-113. [Shlyakhin D.A. Refined solution of the dynamic problem of electroelasticity for a bimorphous plate. Vestnik KRSU. 2016. Volume 16. №5. P.108-113. (in Russ)]

Сведения об авторах:

Шляхин Дмитрий Аверкиевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Строительная механика и сопротивление материалов».

Ратманова Олеся Викторовна – ассистент кафедры «Строительная механика и сопротивление материалов».

Information about the author.

Dmitiy A. Shlyakhin - Dr. Sci. (Technical), Prof., Department of Building Mechanics and Structural Resistance.

Olesya V. Ratmanova – Lecturer, Department of Building Mechanics and Structural Resistance

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 26.06.2018.

Принята в печать 30.08.2018.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 26.06.2018.

Accepted for publication 30.08.2018.

Для цитирования: Ахмедов Г.Я., Курбанисмаилова А.С. Разработка методики эксплуатации геотермальных систем при извлечении попутных газов. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2018;45 (3):29-38. DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-3-29-38

For citation: Akhmedov G.Ya., Kurbanismailova A.S. Development of the technique of operation of geothermal systems when extracting associated gases. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2018; 45(3):29-38. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-3-29-38

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 620.191

DOI: 10.21822/2073-6185-2018-45-3-29-38

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ СИСТЕМ ПРИ ИЗВЛЕЧЕНИИ ПОПУТНЫХ ГАЗОВ

Ахмедов Г.Я.¹, Курбанисмаилова А.С.²

¹Дагестанский государственный технический университет,

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

²Институт геологии ДНЦ РАН,

²367010 г.Махачкала, пр. Ярагского, 75, Россия,

¹e-mail:ganapi@mail.ru; ²e-mail:mamaeva11187@mail.ru

Резюме. Цель. Целью исследования является разработка методики эксплуатации геотермальных энергетических систем в режиме без солеотложения при утилизации попутных с геотермальной водой горючих газов на скважинах с невысоким газовым фактором. **Метод.** Исследования проводились на основе анализа содержания попутных горючих газов в подземных термоминеральных водах месторождений Северного Кавказа и Предкавказья и оценки возможности их утилизации и использования в целях отопления и горячего водоснабжения. При этом использованы закономерности растворения и десорбции метана и углекислого газа из растворов подземных вод с содержанием в них накипеобразующих компонентов, в частности, карбоната кальция. **Результат.** На основе проведенных исследований установлено, что эксплуатацию геотермальных систем в энергетике целесообразно проводить после предварительного вывода максимально возможного количества попутных горючих газов из раствора воды, сохраняя при этом содержание углекислого газа в воде на уровне выше равновесного значения. Приведена схема эффективной работы термораспределительных станций с предотвращением в них карбонатных отложений путем использования продуктов сгорания попутного газа в отработанной воде при закачке ее обратно в водоносный горизонт. **Вывод.** В результате проведенных исследований разработана методика эксплуатации геотермальных энергетических систем в режиме без солеотложения при утилизации попутных с геотермальной водой горючих газов. Установлено, что для ускорения растворения углекислого газа в воде для ее стабилизации перед вводом в теплообменное оборудование целесообразно увеличить парциальное давление углекислого газа до значений, превышающих на порядок равновесное при данной температуре. При этом перед закачкой отработанной воды обратно в водоносный горизонт избыток углекислого газа выводится из воды.

Ключевые слова: геотермальная вода, попутные горючие газы, метан, солеотложение, карбонат кальция, энергетическое оборудование

TECHNICAL SCIENCE
POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL MECHANICAL ENGINEERING

DEVELOPMENT OF THE TECHNIQUE OF OPERATION OF GEOTHERMAL SYSTEMS
WHEN EXTRACTING ASSOCIATED GASES

Ganapi Ya.Akhmedov¹, Azha S. Kurbanismailova²

¹Daghestan State Technical University,

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

²Institute of Geology, Daghestan Scientific Centre of RA,

²75 M. Yaragskogo Ave., Makhachkala 367010, Russia,

¹e-mail:ganapi@mail.ru, ²e-mail:mamaeva11187@mail.ru

Abstract Objectives The aim of the study is to develop a method of operating geothermal energy systems in the mode without scaling when disposing of flammable gases with geothermal water in wells with a low gas factor. **Method** The studies were conducted on the basis of analyzing the content of associated flammable gases in the underground thermal mineral waters of the North Caucasus and Ciscaucasian deposits and assessing the possibility of their utilization and use for heating and hot water supply. In this case, the laws of dissolution and desorption of methane and carbon dioxide from ground-water solutions with the content of scale-forming components, in particular, calcium carbonate, are used. **Result.** On the basis of the conducted research, it was found that the operation of geothermal systems in the power industry should be carried out after preliminary withdrawal of the maximum possible amount of associated flammable gases from a water solution, while maintaining the content of carbon dioxide in water at a level above the equilibrium value. The scheme of the effective operation of thermal distribution stations with the prevention of carbonate deposits in them is given by using the products of associated gas combustion in the waste water when it is pumped back into the aquifer. **Conclusion.** As a result of the research conducted, a method of operating geothermal energy systems in a non-salt-scale mode has been developed for utilization of combustible gases associated with geothermal water. It has been established that in order to accelerate the dissolution of carbon dioxide in water to stabilize it before entering heat-exchange equipment, it is advisable to increase the partial pressure of carbon dioxide to values exceeding by an order of magnitude the equilibrium at a given temperature. At the same time, before pumping waste water back into the aquifer, excess carbon dioxide is removed from the water.

Keywords: geothermal water, associated combustible gases, methane, salt deposition, calcium carbonate, power equipment

Введение. На многих месторождениях геотермальных вод Северного Кавказа и Предкавказья вместе с водой поступает и горючий газ, в основном, метан, который может быть использован на скважинах для получения дополнительной энергии. Газовый фактор этих вод варьирует, в среднем, в пределах от 1 до 3 м³/м³ [1]. Расчеты показывают, что при дебите скважины 2000 м³/сут с газовым фактором 1 м³/м³ и наличии 60% метана в смеси газов за сутки можно получить около 1000 м³ метана.

Однако попытки утилизации попутных горючих газов из метановых вод при газовом факторе менее 2÷3 м³/м³ на практике наталкиваются на неоправданные расходы их синтеза, сушки, сбора и т.д. С другой стороны, попытки извлечения максимального количества попутных газов из геотермальных вод путем снижения общего давления при высоких температурах приводят к дополнительным затратам, связанным с предотвращением твердых отложений на поверхности эксплуатируемого оборудования. Причина – нарушение химического равновесия между растворенными в воде компонентами.

В связи с этим имеется проблема утилизации попутных с геотермальной водой горючих

газов, сохраняя при этом работу оборудования геотермальных систем в режиме без солеотложения [2-7].

Постановка задачи. Целью исследования является разработка методики эксплуатации геотермальных энергетических систем в режиме без солеотложения при утилизации попутных с геотермальной водой горючих газов на скважинах с невысоким газовым фактором. По степени изученности растворенных газов в водах геотермальных месторождений в нашей стране Предкавказье занимает особое место. Здесь во второй половине прошлого века в течение нескольких десятков лет проводились исследования, которые показали, что в составе вод кумского горизонта (глубина залегания в интервале 1300-1400 м) преобладает метан (70-90 %). Тяжелые углеводороды составляют, в среднем, 2,6-9,5 %. Углекислого газа содержится 3-6 %, азота 1-4 %. В зависимости от глубин газовые факторы составляют от 1 до 5 м³/м³. На больших глубинах (более 4000 м) предполагается наличие газовой смеси с высокими газовыми факторами [1]. Газовый фактор скважин Северного Кавказа, в среднем, составляет 1÷3 м³/м³.

Для достижения максимального выхода метана из геотермальной воды необходимо снижать общее давление в системе при высокой температуре. Однако, в этих случаях возможно нарушение карбонатно-кальциевого равновесия в растворе воды из-за снижения концентрации углекислого газа в нем.

В связи с этим необходимо разработать методику эксплуатации энергетического оборудования геотермальных систем в режиме без солеотложения при извлечении горючих газов. При этом необходимо придерживаться равновесных параметров воды используемых скважин, а также учитывать растворимость газов в воде [8]. К тому же, для расчета времени дегазации воды или растворения в ней газа необходимо учесть динамику самого процесса, зависящего как от диффузионного коэффициента β , так и от площади поверхности раздела сред S . В данном случае расчет нужно вести с учетом равновесных концентраций метана или углекислого газа C при данной температуре.

Методы исследования. Процесс выхода газов из воды начинается еще в скважине. При перемещении воды вдоль нее на глубине, соответствующей давлению насыщения воды газами, начинается выход, в первую очередь, газов с наименьшей растворимостью. Для наглядности на рис.1 представлена схема начала выхода метана CH₄ (точка 1), углекислого газа CO₂ (точка 2) и, в случае нарушения углекислотного равновесия в растворе воды, начала (точка 3) формирования на стенках труб твердых отложений карбоната кальция (позиция 4).

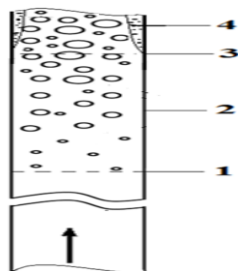


Рис.1. Выход газов в скважине

Fig.1. Gas outlet in the well

Для геотермальных скважин Северного Кавказа и Предкавказья общее давление вместе с парами воды создается, в основном, легкими углеводородами, углекислым газом и азотом (менее 5 %)

$$P = P_{H_2O} + P_{угл} + P_{CO_2} + P_{N_2} \quad (1)$$

Для упрощения формулы (1) в ней можно опустить выражение для давления азота ввиду его малых значений, а давление легких углеводородов выразить через давление метана, т.к. его в общей массе углеводородов более 90 – 97%.

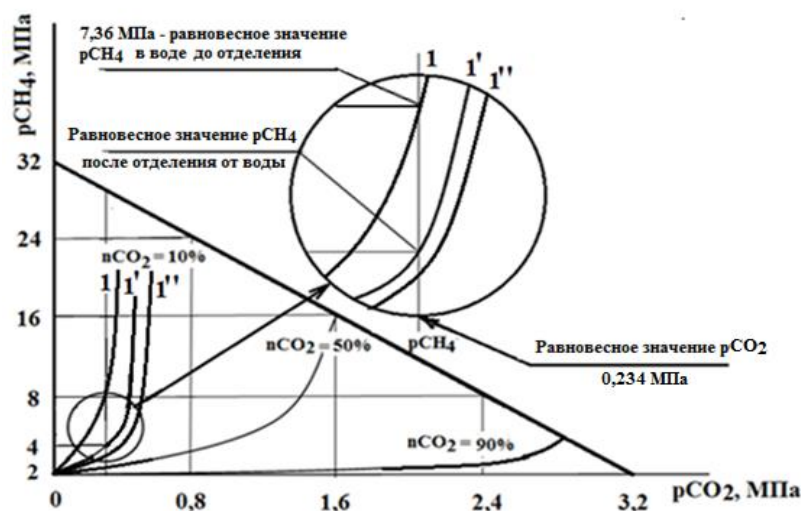


Рис.2. Влияние изменения общего давления на изменение парциальных давлений p_{CO_2} и p_{CH_4} в воде

Fig.2. The effect of the change in the total pressure on the change in the partial pressures of p_{CO_2} and p_{CH_4} in water

При этом концентрацию i – того компонента газа можно найти по закону Генри

$$C_i = K_i \cdot P_i, \quad (2)$$

где K_i и P_i – соответственно, константа Генри (моль/(м³·Па)) и парциальное давление i – того компонента газа (Па).

Для оценки возможности утилизации попутного с геотермальной водой метана необходимо сначала рассмотреть закономерности взаимосвязи концентраций углекислого газа и метана в геотермальной воде при изменениях общего давления. Так, в работе [9] представлено влияние изменения общего давления на изменение парциальных давлений CO_2 и CH_4 в геотермальной воде при разных соотношениях p_{CO_2} и p_{CH_4} (рис.2).

Линия $P - P_{H_2O} = P_{CH_4} + P_{CO_2}$ изображена в виде прямой, соединяющей точки на осях абсциссы и ординаты со значениями давлений p_{CO_2} и p_{CH_4} соответственно 3,2 МПа и 32 МПа. В области выше прямой $P - P_{H_2O} = P_{CH_4} + P_{CO_2}$ растворимость газов не управляется давлением, т.к. концентрация этих газов в воде находится на уровне насыщения, соответствующая тем условиям, при которых они формировались в пласте.

Ниже этой прямой растворимость CH_4 и CO_2 определяется общим давлением при всевозможных их значениях с заданным газовым фактором. В этой области изображены зависимости

$$p_{CH_4} = f(p_{CO_2}) \quad (3)$$

для конкретных значений мольных долей n_{CO_2} и n_{CH_4} (10:90; 50:50; 90:10), из которых следует, что изменению общего давления соответствует почти пропорциональное изменение парциального давления того газа, содержание которого наибольшее в смеси газов. Так, при $n_{CO_2} = 10\%$ снижение общего давления в два раза связано, в основном, со снижением p_{CH_4} , а p_{CO_2} снижается всего лишь на 1%.

Используя вышесказанное можно сделать вывод, что отделение метана необходимо производить в скважине на глубине, соответствующей давлению насыщения. При этом парциальное давление CO_2 не должно быть ниже равновесного значения, при котором возможны отложения твердой фазы $CaCO_3$.

Для решения поставленной задачи автором работы [9] предложено устройство, устанавливаемое на конце насосно-компрессорных труб (НКТ) в скважине на глубине, соответствующей давлению насыщения или чуть выше. При обтекании цилиндра 1 геотермальной водой,

вследствие снижения давления в промежутке между ним и скважиной, происходит выделение, в основном, малорастворимого CH_4 в количестве пропорциональном снижению общего давления на этом участке. Основная масса воды, обедненная CH_4 , поступает в НКТ, а обогащенная газом водяная смесь - в затрубное пространство (рис. 3).

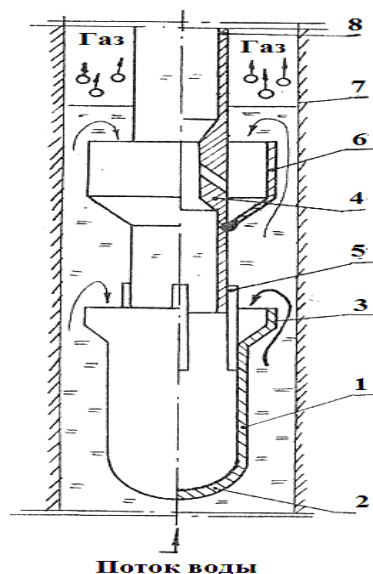


Рис. 3. Устройство для отделения метана: 1 – цилиндр; 2- сферический оголовок; 3- обечайка; 4 – эжектор; 5 – пальцы крепления; 6 – разделитель; 7 – скважина; 8 – насосно-компрессорные трубы

Fig. 3. A device for separating methane: 1 - a cylinder; 2- spherical tip; 3- shell; 4 - ejector; 5 - mounting fingers; 6 - separator; 7 - well; 8 - tubing

Происходит разделение смеси на газовую, а также жидкую фазу, которая по достижении камеры смешения отсасывается внутрь НКТ. При этом CH_4 собирается в устье скважины. Таким образом по НКТ поднимается геотермальная вода с увеличенным соотношением $p\text{CO}_2/p\text{CH}_4$, вследствие чего и можно снизить давление на устье скважины, не вызывая при этом отложений в НКТ твердой фазы CaCO_3 . В межтрубном пространстве образование твердых отложений также не произойдет, так как выше эжектора давление опять возрастает и выделение CO_2 , практически прекращается. Высота поднятия жидкости в межтрубном пространстве регулируется на устье скважины путем управления производительностью скважины по CH_4 .

Если учесть, что скорость диффузии CH_4 больше чем на порядок скорости диффузии CO_2 , то задавая длину цилиндрической части устройства так, чтобы время обтекания водой цилиндра было равно времени отделения CH_4 при заданном перепаде давлений на нем, можно повысить селективность извлечения CH_4 и эффективность использования устройства.

Кривая 1 (рис.2) показывает закон изменения $p\text{CO}_2$ и $p\text{CH}_4$ при соотношении их концентраций 10:90. В дальнейшем это соотношение меняется и закон изменения $p\text{CO}_2$ и $p\text{CH}_4$ будет изображаться кривой 1¹ (при новом газовом факторе). С учетом кинетики процессов десорбции CO_2 и CH_4 зависимость $p\text{CH}_4 = f(p\text{CO}_2)$ будет изображаться кривой 1¹¹.

Аналогичные работы имеются и у зарубежных исследователей [10], в которых утилизация CO_2 одновременно сопровождается и сбором CH_4 из геотермальных вод. При этом часть CO_2 зака-

чивается вместе с отработанной геотермальной водой обратно в водоносный горизонт.

Скорость десорбции свободной углекислоты достаточно хорошо описывается дифференциальным уравнением первого порядка [11, 12]

$$\frac{dC}{d\tau} = -\frac{S^* \beta}{V} (C^* - C_\infty^*) \quad (4)$$

где C_o^* , C_∞^* , C^* - начальное, конечное и текущее значения концентрации

CO_2 в воде, соответственно; S^* - площадь поверхности соприкосновения раздела фаз; V - объем воды; β - коэффициент десорбции, зависящий от интенсивности перемешивания, температуры и природы газа. Решение данного уравнения относительно C^* приводит к выражению

$$C^* = C_\infty^* + (C_o^* - C_\infty^*) e^{-\frac{S^* \beta}{V} \tau} \quad (5)$$

Время выхода газа оценим исходя из (5)

$$\tau = \frac{V}{S^* \cdot \beta} \ln \frac{C_o^* - C_\infty^*}{(C^* - C_\infty^*)} \quad (6)$$

Таким же уравнением, но с другим значением для коэффициента β , можно описать и выход CH_4 из воды.

Обсуждение результатов. На основе проведенных исследований и разработки новых геотермальных энергетических установок предлагается методика их эксплуатации в режиме без карбонатных отложений. На рис.4 представлена схема энергетической установки с возможностью увеличения выхода CH_4 из геотермальной воды путем барботажной ее водяным паром в дегазаторе.

Вода из скважины 2 через линию 1 поступает в газоотделитель 3, давление, в котором может опускаться ниже давления насыщения воды, что увеличивает выход из нее горючих газов.

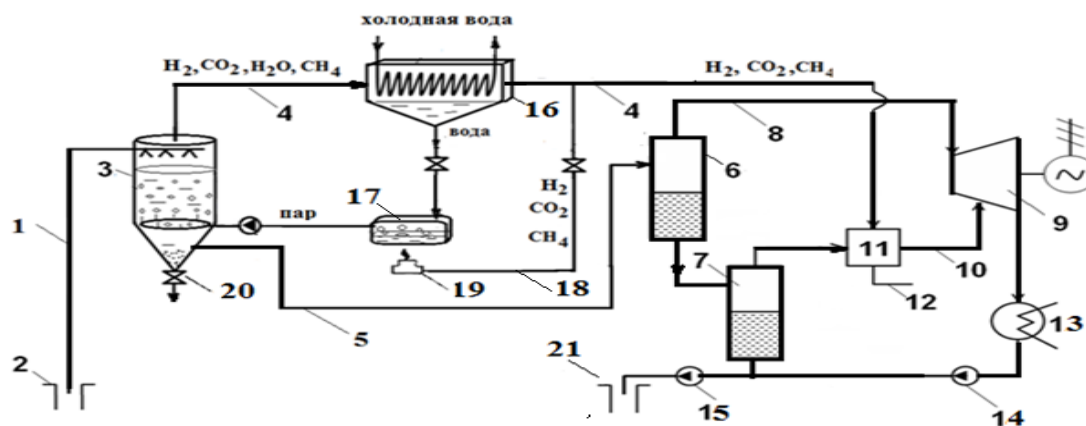


Рис.4. Энергетическая установка с возможностью увеличения выхода метана из геотермальной воды

Fig.4. Power plant with the possibility of increasing the release of methane from geothermal water

Выделившиеся газы отводят из газоотделителя 3 по линии 4 через осушитель газа 16 к камере 11 сгорания. Воду из газоотделителя 3 по трубопроводу 5 отводят к первой ступени 6 из последовательно соединенных ступеней расширителя.

Образовавшееся в результате снижения давления в этой ступени 6 расширителя рабочее тело-пар поступает к входу турбины 9, а вода в следующую ступень 7 расширителя. В осушителе 16 пар, содержащийся в смеси газов, конденсируется и собирается в нижней его части и далее поступает в парогенератор 17, а очищенный от паров воды газ поступает в камеру сгорания 11, куда также поступает воздух по патрубку 12 в количестве, необходимом для горения. Продукты сгорания смешиваются в камере 11 сгорания с паром из расширителя и эта смесь — рабочее тело поступает в турбину 9. Отсутствие паров воды в смеси горючих газов, поступающих в камеру сгорания, увеличивает стабильность их горения и приводит к еще большему повышению температуры поступающего в турбину 9 рабочего тела. По линии 18 часть газа, которая отводится от линии 4 на выходе осушителя 16, попадает в парогенератор 17 в качестве топлива.

Образовавшийся в парогенераторе 17 чистый (без смеси газов) пар поступает в газоотделитель 3, где происходит процесс барботажной геотермальной воды, приводящий к усилению выхода из нее смеси, в том числе, и горючих газов. При уменьшении парциального давления CO_2 в газоотделителе 3 ниже равновесного значения возможны отложения в нем карбоната кальция. Для этого случая в газоотделителе 3 предусмотрено использование циркулирующей в нем кристаллической затравки, приводящей воду к стабилизации в течение 2- 3 минут [13]. Одновременно, защиту стенок расширителей 6 и 7, также в случае нарушения в воде карбонатно-кальциевого равновесия, предусмотрено путем использования рубашек охлаждения [14].

При этом использованная для охлаждения водопроводная вода в дальнейшем идет на горячее водоснабжение.

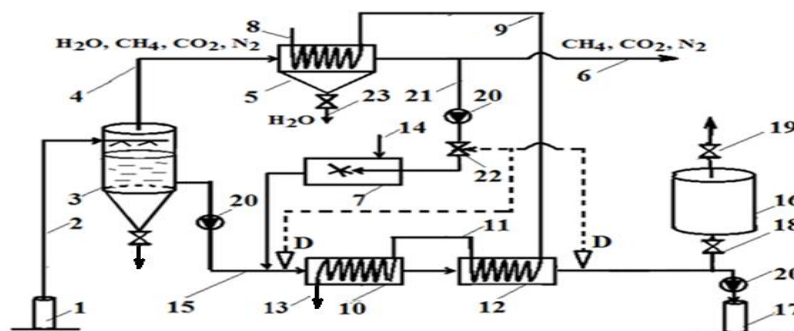


Рис. 5. Геотермальное устройство с защитой оборудования от карбонатных отложений
Fig. 5. Geothermal device with the protection of equipment from carbonate sediments

Необходимо отметить, что выход газов из воды продолжается и в наземном оборудовании геотермальных систем. Особенно интенсивным этот процесс становится при резких перепадах давления, к примеру, в дегазаторах, расширителях, что сопровождается интенсивным выделением твердой фазы карбоната кальция, как в растворе воды, так и на поверхности оборудования. Из-за разнообразия химического состава геотермальных вод и содержания в них различных газов соблюдать нормы проектирования геотермальных объектов согласно [15] представляется не всегда возможным.

В частности, на скважинах месторождений Кизляр и Махачкала-Тернаир с температурой воды около 100 °С имеет место образование отложений карбоната кальция, как в дегазаторах, так и на поверхности теплообменного оборудования. Решить эту проблему можно использованием продуктов сгорания части осушенного газа, где метан составляет более 60 -70% от общего содержания газов. Схема устройства, на котором реализуется решение данной проблемы, представлена на рис.5.

Вода из скважины 2 через линию 1 поступает в газоотделитель 3, давление, в котором, опускается ниже давления насыщения воды газами. Геотермальная вода, освобожденная от сопутствующих газов, из нижней части газоотделителя 3 по линии 15 поступает к теплообменникам 10 и 12 и далее в скважину закачки 17. Выделившиеся газы отводят к потребителю по линиям 4 и 6 через осушитель газа 5. Часть газа по линии 21 поступает в камеру сгорания 7 через автоматически регулируемую запорную арматуру 22, а продукты горения поступают в геотермальную воду на линии 15 в точке подключения к теплообменнику 10. В осушителе 5 благодаря холодной воде, поступающей во вторичный контур по линии 8, пары воды из газовой смеси конденсируются. Конденсированная вода выводится по линии 23.

Одновременно по линии 9 водопроводная вода, частично подогретая в осушителе 5 горючими газами, противотоком по вторичному контуру поступает в теплообменники 12 и 10. В дальнейшем по линии 13 она идет для подачи в систему отопления или горячего водоснабжения. Для обеспечения подачи газа и геотермальной воды к потребителям и далее в скважину закачки 17 предусмотрены насосы 20. Понижение давления ниже насыщения воды углекислым газом в газоотделителе 3 и в теплообменном оборудовании приводит к нарушению карбонатно-кальциевого равновесия в растворе геотермальной воды, что нередко имеет место на практике. В результате этого в теплообменном оборудовании образуются твердые отложения карбоната кальция, как наиболее распространенного вида отложений. Подача продуктов сгорания из камеры 7 в геотермальную воду на линии 15 способствует растворению углекислого газа в ней и предотвращению отложения карбоната кальция в теплообменниках 10 и 12, а также и в скважине 17 закачки отработанной воды. При этом обеспечивается частичный подогрев геотермальной воды, идущей в теплообменники. Одновременно повышается и турбулизация потока воды в теплообменниках,

что улучшает коэффициент теплопередачи через теплообменную поверхность. Регулирование подачи части горючего газа в камеру сгорания 7 осуществляется запорной арматурой 22 по показаниям датчиков D солеотложения, основанных на электропроводности воды, отложений и материала оборудования [16, 17]. Резервуар 16 служит для сбора излишнего количества углекислого газа, подаваемого в скважину 17, что регулируется запорной арматурой 18 и 19.

Для геотермального устройства на рис.5 при вводе углекислого газа в геотермальную воду перед теплообменниками необходимо достичь равновесной концентрации ее в возможно кратчайшие сроки. Так, уравнение кинетики растворения CO_2 аналогично уравнению ее десорбции из воды

$$C^* = C_p^* - (C_p^* - C_o^*) e^{-\frac{S^* \beta}{V} \tau} \quad (7)$$

где C_p^* - равновесная концентрация газа при соответствующем давлении и температуре воды;
 C_o^* - начальная концентрация газа в воде.

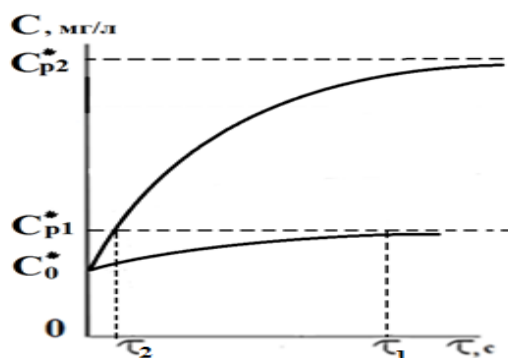


Рис.6. Кинетика растворения углекислого газа при изменении равновесной концентрации его в геотермальной воде

Fig.6. The kinetics of carbon dioxide dissolution with a change in its equilibrium concentration in geothermal water

В связи с этим (рис.6), для уменьшения времени растворения необходимого количества CO_2 в воде до достижения значения концентрации C_{p1}^* рекомендуется увеличить парциальное давления углекислого газа до значения, соответствующего равновесному на порядок выше, чем для C_{p1}^* , то есть до давления соответствующего равновесной концентрации C_{p2}^* согласно закону Генри (2). Величину времени растворения τ газа можно оценить исходя из формулы (7) для начальных давлений, соответствующих равновесным концентрациям газов в воде C_{p1}^* и C_{p2}^*

$$\tau_1 = \frac{V}{S^* \cdot \beta} \ln \frac{C_{p1}^* - C_o^*}{(C_{p1}^* - C^*)} \quad (8)$$

$$\tau_2 = \frac{V}{S^* \cdot \beta} \ln \frac{C_{p2}^* - C_o^*}{(C_{p2}^* - C_{p1}^*)} \quad (9)$$

В формуле (8) для достижения равновесия в растворе воды необходимо стремиться получить концентрацию C_{p1}^* в течение времени τ_1 , стремящегося к бесконечности, в то время как для получения концентрации C_{p1}^* для второго случая согласно формуле (9) время τ_2 гораздо

меньше. Это вытекает из условия, что $C_{P1}^* - C^* \gg C_{P2}^* - C_{P1}^*$ при C^* , стремящемся к C_{P1}^* .

Таким образом, подача углекислого газа (рис.5) на линии 15 ввода геотермальной воды в теплообменники с парциальным давлением, превышающим равновесное значение, ускоряет стабилизацию воды и предотвращает образование карбонатных отложений в теплообменном оборудовании. В тоже время, в случае образования отложений в теплообменниках 10 и 12 имеется возможность их растворения путем подачи избыточного количества CO_2 на линии 15 ввода в них геотермальной воды [18].

Вывод. В результате проведенных исследований разработана методика эксплуатации геотермальных энергетических систем в режиме без солеотложения при утилизации попутных с геотермальной водой горючих газов. Установлено, что для ускорения растворения CO_2 в воде для ее стабилизации перед вводом в теплообменное оборудование целесообразно увеличить парциальное давление CO_2 до значений, превышающих на порядок равновесное при данной температуре. При этом перед закачкой отработанной воды обратно в водоносный горизонт избыток углекислого газа выводится из воды.

Библиографический список:

1. Акулинчев Б.П., Панченко А.С., Пугачева М.Ф. Водорастворенные газы Предкавказья и проблемы их использования в народном хозяйстве //Ресурсы нетрадиционного газового сырья и проблемы его освоения. Ленинград, 1990 г. С. 138-144.
2. John W. Lund ,Tonya L. Boyd. Direct utilization of geothermal energy 2015 worldwide review//Geothermics, March 2016.- Volume 60. - Pages 66-93
3. Holm, Alison. Geothermal Energy: International Market Update: Geothermal Energy Association [Электронный ресурс] /Alison Holm, Leslie Blodgett, Dan Jennejohn, Karl Gawell. - May 2010). - pp. 7. – Режим доступа: http://www.geoenergy.org/pdf/reports/gea_international_market_report_final_may_2010.pdf.
4. Курбанов, М.К. Геотермальные и гидротермальные ресурсы Восточного Кавказа и Предкавказья / М.К. Курбанов // М.: Наука, МАИК «Наука/Интерпериодика», 2001. – 260 с.
5. Султанов Ю.И., Завьялов С.Ф., Бадавов Г.Б. Возможности использования горючих газов на термоводозаборе Махачкала I –Тернаир /Ежегодник: Геотермия. М.: Наука, 1991.- С. 47 – 53.
6. SanjaMrazovac, Djordje Basic. Methane-rich geothermal waters in the Pannonian Basin of Vojvodina (northern Serbia) //Geothermics, September 2009.- Volume 38.-Issue 3.- Pages 303-312
7. Ganjdanesh, Reza; Hosseini, SeyyedAbolfazl. Potential assessment of methane and heat production from geopressured-geothermal aquifers//Geothermal Energy; Heidelberg 4.1 (Nov 2016): 1-25.
8. Ахмедов Г.Я. Защита геотермальных систем водоподготовки от карбонатных отложений //Энергосбережение и водоподготовка.- 2010.- № 6.- С. 18-21.
9. Абдуллаев А.Н. Предотвращение образования отложений твердой фазы CaCO_3 в скважине/Ежегодник: Геотермия. М.: Наука, 1991.- С. 81 – 84.
10. Pat. US 9121259 B2, C10L3/06, C07C1/00, B01J19/00, E21B43/295, C07C7/10. Storing carbon dioxide and producing methane and geothermal energy from deep saline aquifers /Steven L. Bryant, Gary A. Pope. Pub. 01.09.2015 (режимдоступа: <https://www.google.ch/patents/US9121259>)
11. Оликер, И.И. Термическая деаэрация воды на тепловых электростанциях /И.И. Оликер, В.А. Пермяков. – Л.: Энергия, 1971. – 185 с.
12. Пермяков, В.А. Исследование применения парового барботажа в термических деаэраторах: автореф. дис. ... канд. техн. наук /Пермяков В.А. – Москва: МЭИ, 1954. – 23 с.
13. Ахмедов Г.Я. Стабилизационная обработка геотермальных вод //Водоснабжение и санитарная техника.- 2010.- № 6.- С. 33-38.
14. Ахмедов Г.Я. К вопросу о влиянии теплопередачи на отложение твердой фазы карбоната кальция на теплообменной поверхности //Энергосбережение и водоподготовка.- 2011.- № 6.- С. 6 – 8.
15. Геотермальное теплоснабжение жилых и общественных зданий и сооружений. ВСН 56-87. Нормы проектирования. – М.: Стройиздат, 1989. – 50 с.

References:

1. Akulinchev B.P., Panchenko A.S., Pugacheva M.F. Vodorastvorennyye gazy Predkavkaz'ya i problemy ikh ispol'zovaniya v narodnom khozyaystve //Resursy netraditsionnogo gazovogo syr'ya i problemy yego osvoyeniya. Leningrad, 1990 g. S. 138-144. [Akulinchev B.P., Panchenko A.S., Pugacheva M.F. Water-dissolved gases of Cis-caucasia and the problems of their use in the national economy // Resources of unconventional gas raw materials and problems of its development. Leningrad, 1990, pp. 138-144. (in Russ)]
2. John W. Lund ,Tonya L. Boyd. Direct utilization of geothermal energy 2015 worldwide review//Geothermics, March 2016.- Volume 60. - Pages 66-93

3. Holm, Alison. Geothermal Energy: International Market Update: Geothermal Energy Association [Elektronnyy resurs]/Alison Holm, Leslie Blodgett, Dan Jennejohn, Karl Gawell. May 2010). pp.7. rezhim dostupa: http://www.geoenergy.org/pdf/reports/gea_international_market_report_final_may_2010.pdf.
4. Kurbanov, M.K. Geotermal'nyye i gidrotermal'nyye resursy Vostochnogo Kavkaza i Predkavkaz'ya / M.K. Kurbanov // M.: Nauka, MAIK «Nauka/Interperiodika», 2001. – 260 s. [Kurbanov, M.K. Geothermal and hydrothermal resources of the Eastern Caucasus and Ciscaucasia / M.K. Kurbanov // M.: Science, MAIK "Science / Interperiodica", 2001. - 260 p. (in Russ)]
5. Sultanov YU.I., Zav'yalov S.F., Badavov G.B. Vozmozhnosti ispol'zovaniya goryuchikh gazov na termovodozabore Makhachkala I – Ternair / Yezhegodnik: Geotermiya. M.: Nauka, 1991.- S. 47 – 53. [Sultanov, Yu.I., Zavyalov, SF, Badavov, G. B. Possibilities of using combustible gases at thermal water intake Makhachkala I – Ternair / Yearbook: Geothermy. M.: Nauka, 1991.- p. 47-53. (in Russ)]
6. SanjaMrazovac, Djordje Basic. Methane-rich geothermal waters in the Pannonian Basin of Vojvodina (northern Serbia) // Geothermics, September 2009.- Volume 38.-Issue 3.- Pages 303-312
7. Ganjdanes, Reza; Hosseini, SeyyedAbolfazl. Potential assessment of methane and heat production from geopressed-geothermal aquifers // Geothermal Energy; Heidelberg 4.1 (Nov 2016): 1-25.
8. Akhmedov G.YA. Zashchita geotermal'nykh sistem vodopodgotovki ot karbonatnykh otlozheniy // Energoberezhniye i vodopodgotovka.- 2010.- № 6.- S. 18-21. [Akhmedov G.Ya. Protection of geothermal water treatment systems from carbonate sediments // Energy Saving and Water Treatment. - 2010.- № 6.- P. 18-21. (in Russ)]
9. Abdullayev A.N. Predotvrashcheniye obrazovaniya otlozheniy tverдой fazy CaSO_3 v skvazhine / Yezhegodnik: Geotermiya. M.: Nauka, 1991.- S. 81 – 84. [Abdullaev A.N. Prevention of formation of sediments of the solid phase of CaCO_3 in the well / Yearbook: Geothermy. M.: Science, 1991.- p. 81 - 84. (in Russ)]
10. Pat. US 9121259 B2, C10L3/06, C07C1/00, B01J19/00, E21B43/295, C07C7/10. Storing carbon dioxide and producing methane and geothermal energy from deep saline aquifers / Steven L. Bryant, Gary A. Pope. Pub. 01.09.2015 (rezhim dostupa: <https://www.google.ch/patents/US9121259>)
11. Oliker, I.I. Termicheskaya deaeratsiya vody na teplovyykh elektrostantsiyakh / I.I. Oliker, V.A. Permyakov. – L.: Energiya, 1971. – 185. [Oliker, I.I. Thermal deaeration of water in thermal power plants / I.I. Oliker, V.A. Permyakov. - L.: Energy, 1971. - 185 p. (in Russ)]
12. Permyakov V.A. Issledovaniye primeneniya parovogo barbotazha v termicheskikh deaeratorakh: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk / Permyakov V.A. – Moskva: MEI, 1954. – 23 s. [(Permyakov, V.A. Investigation of the use of steam bubbling in thermal deaerators: author. dis. ... Cand. tech. Sciences / Permyakov VA - Moscow: MEI, 1954. - 23 p.(in Russ)]
13. Akhmedov G.YA. Stabilizatsionnaya obrabotka geotermal'nykh vod // Vodosnabzheniye i sanitarnaya tekhnika.- 2010.- № 6.- S. 33-38. [Akhmedov G.Ya. Stabilization treatment of geothermal waters // Water supply and sanitary engineering .- 2010.- № 6. pp. 33-38. (in Russ)]
14. Akhmedov G.YA. K voprosu o vliyaniy teploperedachi na otlozheniye tverдой fazy karbonata kal'tsiya na teploobmennoy poverkhnosti // Energoberezhniye i vodopodgotovka. 2011. № 6. pp. 6 – 8. [(in Russ)]
15. Geotermal'noye teplokhodosnabzheniye zhilykh i obshchestvennykh zdaniy i sooruzheniy. VSN 56-87. Normy proyektirovaniya. – M.: Stroyizdat, 1989. 50 p. [(in Russ)]

Сведения об авторах:

Ахмедов Ганapi Янгиевич - доктор технических наук, профессор, кафедра физики.

Курбанисмаилова Ажа Сурхаевна - младший научный сотрудник, Институт геологии ДНЦ РАН.

Information about the authors:

Ganapi Ya.Akhmedov - Dr. Sci. (Technical), Prof., Department of Physics.

Azha S. Kurbanismailova - Junior Researcher, Institute of Geology.

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 02.08.2018.

Принята в печать 30.08.2018.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 02.08.2018.

Accepted for publication 30.08.2018.

Для цитирования: Баранов А.Ю., Василенок А.В., Соколова Е.В., Шестакова Е.А. Теплофизические основы производства эффективной аппаратуры для общего криотерапевтического воздействия. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2018; 45 (3): 39-57. DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-3-39-57

For citation: Baranov A.Yu., Vasilenok A.V., Sokolova E.V., Shestakova O.A. Thermophysical bases of production of effective equipment for general cryotherapeutic exposure. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2018; 45 (3): 39-57. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-3-39-57

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.593

DOI: 10.21822/2073-6185-2018-45-3-39-57

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОИЗВОДСТВА ЭФФЕКТИВНОЙ АППАРАТУРЫ ДЛЯ ОБЩЕГО КРИОТЕРАПЕВТИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Баранов А.Ю.¹, Василенок А.В.⁴, Соколова Е.В.², Шестакова Е.А.³

¹⁻⁴Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет
информационных технологий, механики и оптики (Университет ИТМО),

¹⁻⁴190001, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова 9, Россия,

¹e-mail: abaranov@corp.ifmo.ru, ²e-mail: katena-log@mail.ru,

³e-mail: oashestakova@corp.ifmo.ru, ⁴e-mail: vasilenok_anna@mail.ru

Резюме. Цель. Оборудование для общей криотерапии (WBC) используется более 40 лет без четкого представления о механизме лечебного действия, технологических условиях безопасности пациентов, номинальных затратах энергии в системах криостатирования. Неопределенность в основополагающих вопросах производства и эксплуатации криотерапевтического оборудования стало причиной постепенной деградации метода WBC в странах, которые долгое время определяли развитие этого раздела криомедицинской техники. **Метод.** В России, благодаря опережающему развитию научных основ производства и эксплуатации установок для WBC, этот метод динамично развивается. Растет экспорт криотерапевтического оборудования. В иностранной литературе растет число публикаций отрицающих эффекты WBC. Эти статьи описывают исследования, выполненные на аппаратуре зарубежного производства, которое значительно уступает российским образцам. Подобные публикации дискредитируют метод WBC, препятствуют экспорту российского оборудования, мешают распространению эффективной лечебной методики в России. **Результат.** Приведены результаты анализа отличий конструктивных и технологических параметров отечественной и зарубежной аппаратуры. Описана методика численного анализа и оптимизации технологии WBC. Показано, что основой эффективности российского оборудования является рациональные конструктивные решения и высокая энерговооруженность криостатирующей аппаратуры. **Вывод.** Индивидуальная технология проведения процедур сочетает высокую лечебную эффективность с относительно низкими затратами энергии, а также обеспечивает традиционный для медицины принцип индивидуальности лечения. Следует популяризировать результаты исследования для постепенного распространения одноместных установок во всех медицинских учреждениях

Ключевые слова: общая криотерапия, WBC, криогенная камера, система криостатирования, удельные затраты энергии, энергоэффективность, тепловой КПД

TECHNICAL SCIENCE
POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL MECHANICAL ENGINEERING
THERMOPHYSICAL BASES OF PRODUCTION OF EFFECTIVE EQUIPMENT
FOR GENERAL CRYOTHERAPEUTIC EXPOSURE

Alexander Yu. Baranov¹, Anna V. Vasilenok⁴, Ekaterina V. Sokolova², Olga A. Shestakova³

¹⁻⁴Saint Petersburg National Research University of Information Technologies,
Mechanics and Optics (ITMO University),

¹⁻⁴9 Lomonosov Str., St. Petersburg 9190001, Russia,

¹e-mail: abaranov@corp.ifmo.ru, ²e-mail: katena-log@mail.ru,

³e-mail: oashestakova@corp.ifmo.ru, ⁴e-mail: vasilenok_anna@mail.ru

Abstract. Objectives The equipment for general cryotherapy (WBC) has been used for more than 40 years without a clear understanding of the mechanism of therapeutic action, the technological conditions of patient safety, the nominal cost of energy in cryostation systems. Uncertainty in the fundamental issues of the production and operation of cryotherapy equipment has caused a gradual degradation of the WBC method in countries that have long determined the development of this section of cryomedical technology. **Method.** In Russia, thanks to the advanced development of the scientific basis of the production and operation of facilities for the WBC, this method is developing dynamically. Exports of cryo-therapeutic equipment are growing. In the foreign literature, the number of publications denying the effects of the WBC is growing. These articles describe research performed on foreign-made equipment, which is significantly inferior to Russian samples. Such publications discredit the WBC method, hamper the export of Russian equipment, and hinder the spread of effective treatment methods in Russia. **Result.** The results of the analysis of differences in design and technological parameters of domestic and foreign equipment are presented. The technique of numerical analysis and optimization of WBC technology is described. It is shown that the basis of the effectiveness of Russian equipment is rational design solutions and high power supply of cryostatting equipment. **Conclusion.** The individual technology of the procedures combines high therapeutic efficacy with relatively low energy costs, and also provides the traditional medicine principle of individuality of treatment. Research results should be popularized for the gradual distribution of single-unit installations in all medical facilities.

Keywords: general cryotherapy, WBC, cryogenic chamber, cryostat system, specific energy consumption, energy efficiency, thermal efficiency

Введение. Оборудование для общей криотерапии (whole body cryotherapy (WBC)) используется в клиниках мира более 40 лет. Несмотря на это, общепризнанная концепция механизма достижения лечебного эффекта до сих пор не сформирована [1-4], не определены физические условия безопасности и эффективности криогенного охлаждения поверхности кожи пациента. Не определены требования к энерговооруженности оборудования для реализации технологии WBC [5].

В условиях неопределенности технических требований к аппаратуре для WBC производители отдают предпочтение техническим решениям обеспечивающим снижение затрат на изготовление и эксплуатацию специализированных установок. Эти затраты напрямую зависят от номинального уровня температуры в зоне WBC, поэтому незначительное повышение минимальной температуры газа в процедурной кабине обеспечивает существенный экономический эффект.

За 40 лет производства аппаратов для WBC в Западной Европе температура газа в зоне WBC, по экономическим соображениям, выросла почти в два раза от 98 К [6,7] до 192 К [5]. В основном благодаря повышению температуры стоимость аппаратов для групповой WBC уменьшилась в 20 раз. Низкие цены на оборудование обеспечивают высокий уровень продаж, поэтому тенденция дальнейшего повышения рабочей температуры в зоне WBC сохраняется. Повышение уровня температуры сопровождается опережающим снижением энерговооруженности систем криостатирования зоны WBC.

Новейшие установки снабжены рефрижераторами с удельной мощностью электропривода не более 1 кВт/ м^3 . На температурном уровне 170 К рефрижератор с такой мощностью обладает теплоотводящей способностью не более 400 Вт/ м^3 , что сопоставимо с физиологическим тепловыделением пациента в условиях теплового комфорта (150 Вт) [5].

Изменение технологического режима WBC качественно снижает эффективность процедур. Описанные в XX веке лечебные эффекты [6,7,8] невозможно воспроизвести на большинстве современного оборудования для WBC.

Исследования, выполненные в Университете ИТМО, показали, что основной причиной снижения эффективности современных аппаратов является недостаточная интенсивность отвода теплоты с поверхности объекта WBC, кожного покрова человека. Следствием низкой интенсивности отвода теплоты является недостаточное переохлаждение поверхности. Показано, что при заявленных параметрах процесса WBC не может опуститься ниже $+12^\circ\text{C}$ [9], а такого переохлаждения недостаточно для эффективной криостимуляции системы терморегуляции человеческого организма.

Негативные результаты вычислительного эксперимента по моделированию процесса WBC в многоместных устройствах подтверждены многочисленными публикациями о результатах мониторинга температуры кожи пациентов после процедур. По результатам измерений минимальная температура поверхности кожи пациентов составляет от 14°C [10] до $22\text{--}25^\circ\text{C}$ [11,12].

Если учесть, что для эффективного лечения надо понизить температуру до уровня -2°C [13], то многочисленные статьи [11-15] об отсутствии у WBC преимуществ перед водной гипотермией или «ледяными» компрессами представляются абсолютно достоверными. Большинство подобных публикаций основано на исследовании многоместных установок с температурой в зоне WBC не ниже -110°C . Экспериментаторы упускают из виду то, что 40 лет назад, когда были описаны позитивные эффекты WBC, номинальная температура газа в зоне WBC составляла -170°C [6,7]. Повышение температуры теплоотводящей газовой среды от -170°C (103 К) до -110°C (163 К), изменяет абсолютное значение температуры в 1,6 раза, что не может не сказаться на интенсивности отвода теплоты, степени переохлаждения поверхности тела пациентов т.д.

Следует отметить, что оптимальные условия WBC не только в многоместных аппаратах разработанных еще в 90-х годах XX века, но и в современных аналогах российских одноместных WBC устройств.

Международная группа исследователей провела испытания одноместной установки украинского производства [16]. Показано, что при заявленном уровне температуры в процедурной кабине -140°C , действительная температура газа к концу процедуры, через 170 с , опустилась только до -40°C . В таких условиях температура поверхности тела опустилась только до $+18^\circ\text{C}$. Нарушение температурного режима процедуры WBC приводит к снижению эффективности процедур вне зависимости от схемы охлаждения.

Можно утверждать, что в период с 1978 г. по 2018 г. технология, которую принято обозначать аббревиатурой «WBC», качественно изменилась. Причем, судя по современным публикациям, это качественное изменение негативно сказалось на лечебной эффективности процедур, которые совсем недавно успешно использовали для лечения ряда тяжелых заболеваний: ревматоидный артрит, бронхиальная астма, псориаз и т.д.

В России, благодаря опережающему развитию научных основ производства и эксплуатации установок для WBC, разработана и реализуется индивидуальная технология криотерапии. Конструктивные и технологические решения, заложенные в основу производства отечественных установок для WBC, обеспечили им высокую лечебную эффективность. Двадцатилетняя клиническая практика применения WBC не только подтвердила описанные в XX веке эффекты, но и существенно расширила список показаний к использованию криогенного лечения [17]. Растет экспорт российского криотерапевтического оборудования. Но, неопределенность в области технологии WBC продолжает крайне негативно влиять на международный рынок криотерапевтического оборудования. Зарубежные публикации, отрицающие лечебные эффекты WBC дискредитируют эффективное российское оборудование.

В тоже время, несмотря на достаточно большой объем негативной информации о многочисленных WBC аппаратах зарубежного производства, государственные учреждения России продолжают приобретать аппаратуру с номинальной температурой -110 и даже -85°C .

Постановка задачи. Определение и формализация причинно-следственных связей между технологическими параметрами WBC и величиной лечебного эффекта имеют высокое научное и социальное значение. Наиболее наглядным и контролируемым признаком эффективности WBC является продолжительность анальгетического действия, которая может составлять 6-8 часов [5].

Анальгетический эффект WBC впервые был описан и использован в лечебной практике японским врачом Т. Ямаучи [6,7]. Для проведения процедур WBC была изготовлена специальная установка, которая напоминала камеру для длительного хранения продуктов. Процедуры WBC проходили сразу до 12 пациентов. В теплообменники системы охлаждения подавался жидкий азот.

Существует предположение, что Т. Ямаучи поставил перед разработчиками задачу максимально снизить температуру газа в зоне WBC [5,17]. Температурный режим в зоне WBC определялся из условия предупреждения конденсации воздуха. Температура наружной поверхности теплообменника T_{HC} должна быть выше температуры конденсации воздуха T_A'' :

$$T_{HC} > T_A'' = 81 \text{ K.} \quad (1)$$

При естественной конвекции газа в большом объеме расчетный градиент температур между газом и теплоотводящей поверхностью составляет примерно 20 K:

$$\Delta T_{A-HC} = T_A - T_{HC} \approx 20 \text{ K.} \quad (2)$$

С учетом этого, минимальная температура воздуха при расчетной тепловой нагрузке:

$$T_A = T_A'' + \Delta T_{A-HC} \approx 101 \text{ K. } (-172 \text{ C}). \quad (3)$$

Температура в зоне WBC поддерживалась без использования датчиков температуры, так как определялась давлением паров жидкого азота в трубах теплообменника HE (рис. 1). Контроллер уровня жидкости УС по сигналам датчика уровня У управляет работой клапана SV, через который жидкий азот LN поступает в трубы теплообменника HE. Давление паров, 0,22 МПа, регулирует клапан V.

Это определяет температуру кипения азота и труб теплообменника HE. В паузах между процедурами, когда тепловая нагрузка на систему охлаждения снижается в 10 раз [5], температура воздуха в основной кабине приближается к температуре труб теплообменника:

$$\Delta T_{A-HC} \rightarrow 5 \text{ K, } T_A \rightarrow T_A'' + \Delta T_{A-HC} \approx 86 \text{ K } (-187 \text{ C}). \quad (4)$$

Температура воздуха в кабине все время остается на минимально возможном уровне. Отсутствие системы контроля температуры обеспечило японской установке уникальные эксплуатационные преимущества.

Теплообменники, заранее заполненные жидким азотом, успешно справлялись с резким увеличением тепловой нагрузки в момент входа пациентов в зону WBC.

Соотношения температур кипения азота и воздуха, а также особенности конструкции устройства, в котором проводились процедуры, случайным образом создали оптимальные условия для безопасной и эффективной процедуры. Методика быстро распространилась в странах Западной Европы. В Польше и ФРГ производители постарались воспроизвести японскую установку на основе доступной информации.

При этом минимальная температура повысилась до -160°C [5]. Температуру воздуха в кабине регулировал контроллер температуры ТС (рис. 1 б), который, по сигналам температурного сенсора S управлял клапаном подачи жидкого азота SV.

В отсутствии пациентов подача жидкого азота прекращалась, а уровень жидкого азота в теплообменнике HE снижался до минимума. Это не позволяло криостатировать зону WBC в момент входа пациентов. Температура внутренней поверхности части труб теплообменника HE превышает температуру кипения криоагента больше чем на 20 K:

$$T_{HE} \rightarrow T_A \approx 110 \text{ K } \quad T_{HE} > T_A'' + 20 \text{ K.} \quad (5)$$

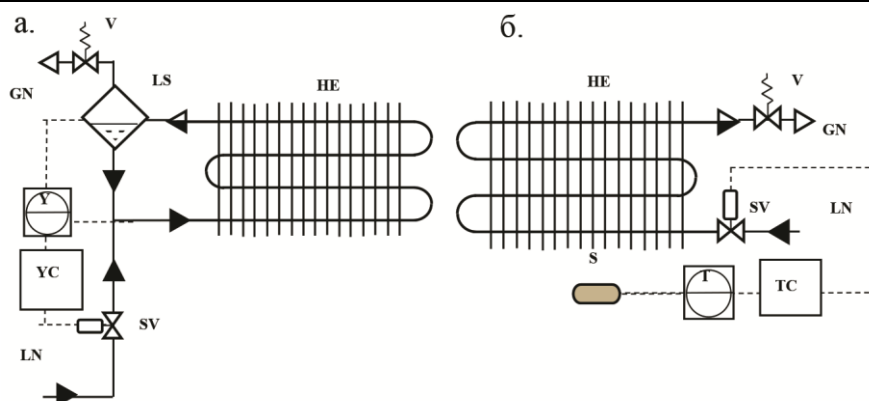


Рис. 1. Азотная система охлаждения зоны WBC японских (а) и европейских (б) установок
Fig. 1. Nitrogen cooling system of the WBC zone of Japanese (a) and European (b) installations.

При входе пациентов в основную кабину проникает относительно теплый воздух из шлюза ($T_s = 210$ K). При подаче жидкого азота в перегретые трубы кипение переходило плочный режим, а парожидкостной, через клапан V сбрасывается в окружающую среду. Теплообменник не обеспечивал отвод теплоты выделяемой от поверхности кожи пациентов, около 5 кВт/чел, и процедура WBC проходила при температуре существенно превышающей номинальные -160°C [5].

Эксплуатационные недостатки азотной системы охлаждения и неопределенность требований к температуре воздуха в основной процедурной кабине создали условия для использования в системе криостатирования зоны WBC трехкаскадных холодильных машин и паровых циклов на газовых смесях [18] и повышения минимальной температуры до уровня -110°C . В начале XXI века для проведения сеансов WBC стали предлагать «криотерапевтические» «CrioHome» с номинальной температурой -85°C , т.е. тенденция к повышению температуры сохраняется.

С 1985 года самостоятельно развивается российское направление устройств для WBC, которое строится на использовании одноместных установок с азотной системой охлаждения (криосаун). Температура в кабине одноместной криосауны в течение всей процедуры составляет не выше -130°C [17]. Основу производства и эксплуатации криосаун составляет разработанная в Университете ИТМО теплофизическая теория WBC.

Методы исследования. Теплофизическая теория WBC была сформулирована для того, чтобы преодолеть неопределенность технологических требований к специализированным аппаратам для проведения WBC. В качестве критерия оптимизации технологии WBC разумно использовать продолжительность анальгетического действия криотерапии. Продолжительность анальгетического действия или эффективное время (ЕТ WBC) легко определить на практике. Для расчета ЕТ WBC предложена формула [17], которая связывает позитивный эффект со степенью приближения температуры поверхности кожи T_s к температуре начала криповреждений $T_{kr} = 270,5$ K, а также с площадью f_s и продолжительностью τ_{max} контакта поверхности тела с криогенным газом:

$$\tau_E = f_s \int_{\tau=0}^{\tau_{max}} \frac{A}{(T_s - T_{kr})^2} d\tau, \quad (6)$$

где A - эмпирическая константа, обеспечивающая расчет ЕТ WBC в секундах, $A=1200$.

Максимальная продолжительность WBC τ_{max} , определяется с учетом требований гипотермической безопасности пациента, которые ограничивают допустимые изменения температуры тела на поверхности T_s и на внутренней границе жирового слоя кожи T_f (рис. 2):

$$T_s \geq 271 \text{ K } (-2^\circ\text{C}) \quad T_f \geq 309 \text{ K } (36^\circ\text{C}).$$

Соблюдение установленных ограничений изменения значения T_s и T_f , защищает пациента от опасности обморожения и переохлаждения соответственно.

На рис.2 приведено графическое изображение оболочки тела (BS) пациента. BS представляет собой наружный слой тела, масса которого составляет 30% от общей массы тела. BS состоит из трех видов тканей: эпителия 1, жировой ткани 2 и мышечной ткани 3. Слои 1 и 2 без вреда

переносят существенное переохлаждение, безопасность пациента обеспечивается в том случае, когда нарушение нормального распределения температур не распространяется далее внутренней границы BS [6].

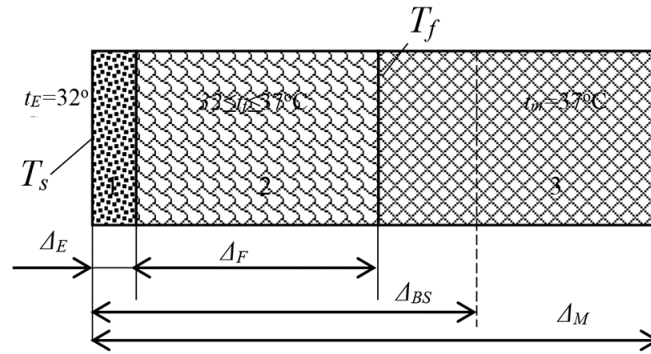


Рис. 2 Физическая модель оболочки тела (BS) человека
 Fig. 2 Physical model of the human body shell (BS)

В нормальном состоянии $t_E=32^\circ\text{C}$, в пределах жирового слоя температура BS повышается $32 \leq t \leq 37^\circ\text{C}$, температура слоя мышц равна температуре ядра тела (BC) человека $t_m = t_{BC}=37^\circ\text{C}$. Принято допущение, что толщина слоев 1 и 2 у среднего пациента имеет следующие значения: $\Delta_E=2 \text{ mm}$; $\Delta_F=2 \text{ mm}$. BS представляет собой относительно тонкий поверхностный слой. Расчетная толщина BS тела среднего человека составляет $\Delta_{BS}=16 \text{ mm}$. При этом эффективный диаметр тела составляет 280 мм [6]. Это позволяет описать процессы переноса теплоты через ткани BS одномерным уравнением энергии:

$$\rho \frac{\partial h}{\partial \tau} = \frac{\partial q_x}{\partial x} + q_v, \quad (7)$$

где h – энтальпия ткани, кДж/кг; τ – время, с; q_x – поток теплоты сквозь BS, Вт/м², x – координата вдоль которой переносится теплота, м; q_v – теплота метаболизма, Вт/м³;

При замене производных разностными приближениями, можно получить алгебраическое выражение, пригодное для автоматизированных вычислений:

$$\rho \frac{\Delta h}{\Delta \tau} = \frac{\Delta q_x}{\Delta x} + q_v, \quad (8)$$

Решая уравнение (8) относительно значения энтальпии на новом временном слое h' , получим:

$$h' = h + \frac{(\Delta q_x + q_v \Delta x) \Delta \tau}{\Delta x \rho}, \quad (9)$$

где $\Delta h = h' - h$, h – значение энтальпии вещества на текущем временном слое; Δx – шаг элементарных участков по координате X , м; $\Delta \tau$ – шаг по времени.

Выражение (9) позволяет рассчитывать энтальпии узловых точек моделируемого объекта при известных граничных и начальных условиях.

Теплофизические свойства тканей оболочки приведены в табл.1.

Благодаря высокому содержанию воды ϕ все ткани BS человека обладают высокой теплоемкостью, которая обеспечивает аккумуляцию значительного количества теплоты. Теплота, накопленная в тканях, защищает органы ядра тела (BC), сердце, легкие, почки, печень от переохлаждения при резком понижении температуры окружающей среды.

Тепловой баланс элементарного участка BS:

$$\Delta h = h' - h = \frac{(\Delta q_x + q_v \Delta x) \Delta \tau}{\Delta x \rho}, \quad (10)$$

определяется соотношением интенсивности тепловых потоков переносимых теплопроводностью ткани вдоль координаты X Δq_x и теплоты выделяемой внутренними источниками q_v .

Таблица 1. Свойства тканей BS человека [19]
Table 1. Properties of Human BS tissues

Ткань Material	ρ , кг/м ³	φ , %	c , Дж/(кг·К)	λ , Вт/(м·К)	q_v , Вт/м ³
Кожа Skin	1093	72,0	3600	0,35	10996
Мышцы Muscle	1041	80,0	3458	0,475	7277
Жировая ткань Fatty tissue	916	20	2250	0,21	–

Интенсивность и направление переноса теплоты теплопроводностью зависит от распределения температур вдоль координаты X:

$$\Delta q_x = q_{i+1} + q_{i-1}, q_{i+1} = \lambda(T_{i+1} - T_i)/\Delta x, q_{i-1} = \lambda(T_{i-1} - T_i)/\Delta x. \quad (11)$$

На границах BS перенос теплоты описывается граничными условиями. Для внешней границы вычисляется интенсивность конвективного отвода теплоты:

$$i = 1, q_{i-1} = \alpha(T_g - T_i), \quad (12)$$

где α коэффициент теплоотдачи при естественной конвекции газа или жидкости, $\alpha = f(T_g, T_i)$, Вт/м² К, T_g - температура теплоотводящей среды, К.

На внутренней границы BS температура тканей за время WBC не изменяется и равна температуре ядра тела T_{BC} :

$$i = n, T_{i+1} = T_{BC} = const. \quad (13)$$

Уравнение (10) описывает изменение теплосодержания тканей во времени $h_i = f(\tau)$, а для формирования отработки вопросов технологии WBC нужно получить аналогичную зависимость для температуры $T_i = f(\tau)$. На каждом шаге по времени по известному значению энтальпии элементов массива рассчитывается значение температуры:

$$T_i = f(h_i). \quad (14)$$

Описанный алгоритм вычислений формирует математическую модель BS тела человека, которая пригодна для исследований процессов терапевтического воздействия низкотемпературными жидкостями и газами.

Математическую модель BS тела человека позволила выполнить численный эксперимент по исследованию физических основ лечебной эффективности WBC. Достаточно часто [11,12] WBC сравнивают с процедурами водной гипотермии. 40 лет не прекращаются попытки заменить WBC более дешевыми водными процедурами.

Моделирование процесса охлаждения поверхности BS водой с температурой 273 К и криогенным газом с температурой 140 К, показало, что в холодной воде минимальная температура поверхности кожи составляет не менее 5,5°C [17]. Расчетная величина длительности анальгетического эффекта после водной гипотермии составляет 31 мин [5].

Использование для охлаждения поверхности BS криогенного газа с температурой 140 К дает совершенно иную картину. Понижение температуры идет почти без изменения темпа:

$$\partial T_{i=1}/\partial \tau \sim const. \quad (15)$$

Минимальное значение температуры $T_{i=1} = 271$ К получено из-за прекращения численного эксперимента по условиям безопасности пациента во время WBC.

Поверхность BS переохладилась до минимально допустимого уровня. Выражение для вычисления продолжительности позитивных эффектов WBC (6), содержит член, который позволяет проиллюстрировать интенсивность стимуляции холодовых рецепторов изменении температуры поверхности BS. Это параметр процедуры получил название интенсивность стимулирующего действия (ISA):

$$I_{SA} = \frac{A}{(T_{i=1} - T_{kr})^2}, \quad (16)$$

График зависимости $I_{SA} = f(T_{i=1})$ (рис. 3) показывает, как возрастает сигнал рецепторов по мере переохлаждения поверхности кожи.

При минимально возможной в условиях водной гипотермии температуре поверхности кожи 5°C , $I_{SA} = 21 \text{ s/s}$, в то время как при WBC максимальное значение 225 раз выше $I_{SA} = 4800 \text{ s/s}$. Различия в интенсивности стимуляции холодových рецепторов определяют лечебные преимущества WBC над водной гипотермией.

Принципиальное значение для разработки технологии WBC имеют данные о количестве теплоты Q_{HC} отведенной с единицы поверхности BS теплоносителем (HC) и интенсивности теплового потока q_{HC} . Общий отвод теплоты определен путем интегрирования мгновенных значений q_{HC} , которые рассчитывались по формуле (12):

$$Q_{HC} = \int_{\tau=0}^{\tau_{max}} q_{HC} d\tau, \quad (17)$$

Расчетные значения Q_{HC} приведены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты численного эксперимента по моделированию отвода теплоты водой с температурой 273 К и газом с температурой 140 К [9]

Table 2. The results of a numerical experiment on the modeling of heat removal by water with a temperature of 273 K and gas with a temperature of 140 K [9]

Результаты Results	Теплоноситель Heat carrier	
	gas	water
Продолжительность охлаждения, τ_{max} , с Cooling time	159	177
Минимальная температура поверхности объекта, T_s , $^{\circ}\text{C}$ Minimum object surface temperature	-2,0	5,5
Минимальная температура на внутренней границе жирового слоя, T_f , $^{\circ}\text{C}$ The minimum temperature at the inner boundary of the fat layer	309,2	309,0
Теплота, отведенная теплоносителем с поверхности тела, Q_{HC} , кДж/м ² The heat removed by the coolant from the surface of the body	440	410
Теплота, отведенная через внутреннюю границу жирового слоя, Q_f , кДж/м ² Heat retracted through the inner boundary of the fat layer	10,2	12,5
Поток теплоты с поверхности тела в начале процесса охлаждения, q_{HC}^{max} , кВт/м ² Heat flow from the body surface at the beginning of the cooling process	3,5	11,3
Поток теплоты с поверхности тела в конце процесса охлаждения, q_{HC}^{min} , кВт/м ² Heat flow from the body surface at the end of the cooling process	2,3	0,95

В криогенном газе отвод теплоты составил 440 кДж/м², что больше на 10% чем в холодной воде. Полученный результат значительно меньше, чем предполагают некоторые популяризаторы WBC, которые оценивают отвод теплоты тела пациента в 1250 – 2500 кДж/м² [20]. В тоже время, полученный результат значительно больше, чем можно отвести из WBC устройства затратив на охлаждение одного пациента 2 кг жидкого азота [20]. Существенное практическое значение имеет оценка мощности удельного потока теплоты, который поверхность BS отдает теплоносителю.

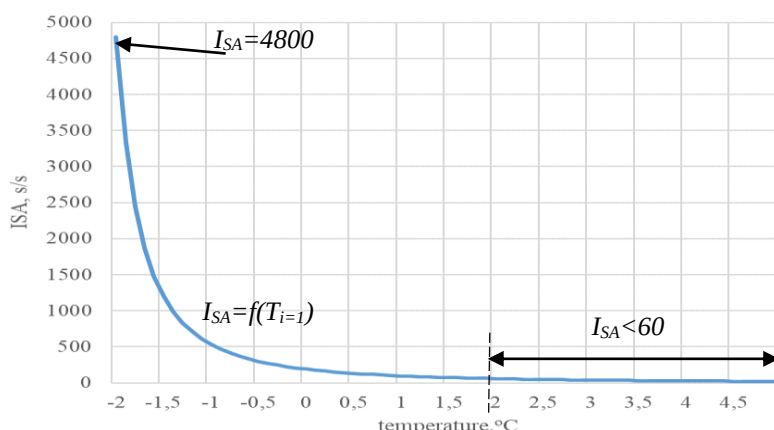


Рис.3. Зависимость интенсивности криостимуляции от температуры кожи

Fig.3. Dependence of cryostimulation intensity on skin temperature

В табл.2 приведены значения максимальные, в начале процедуры, и минимальные, в момент завершения охлаждения, мощности теплового потока к холодной воде и газообразному теплоносителю.

Для проектирования WBC устройств полезно знать среднее значение потока теплоты, который должен отвести теплоноситель

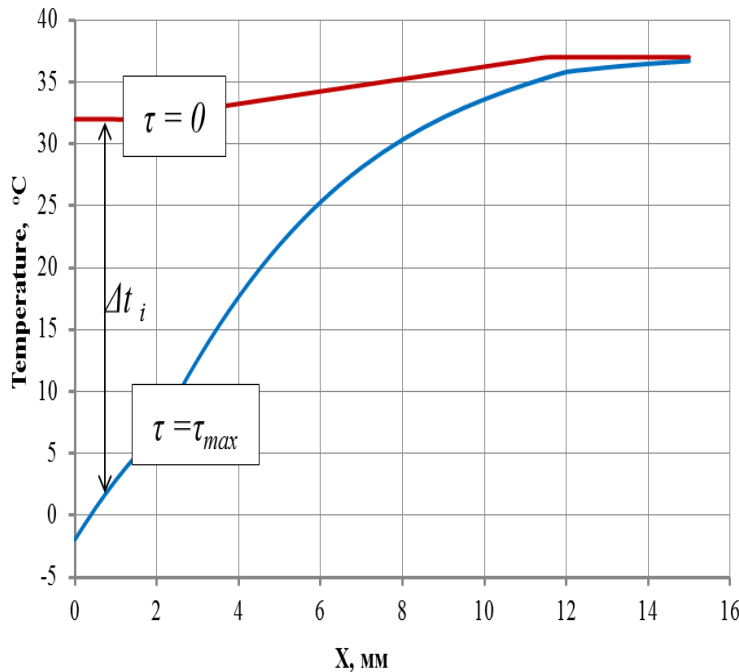


Рис.4. Распределение температур покровных тканей по толщине оболочки до и после процедуры WBC

Fig.4. Temperature distribution of epithelial tissues over the shell thickness before and after the WBC procedure

температурном диапазоне от -2 до 40 °C [10]. Количество отведенной теплоты можно рассчитать по разности температур:

$$\Delta T_i = T_i^{\tau=0} - T_i^{\tau=\tau_{max}} \quad (18)$$

Количество аккумулированной теплоты, отведенное от одного элементарного участка:

$$Q_{Ai} = \Delta T_i \cdot \Delta x \cdot \rho_i \cdot c_i \quad (19)$$

Общее количество теплоты, выделенной за счет переохлаждения каждого из трех видов тканей BS, представляет собой сумму порций теплоты, выделенных на элементарных участках слоя данной ткани:

$$\begin{aligned} \text{эпителиальный слой } 1 \leq i \leq n_E, Q_{AE} &= \sum_{i=1}^{n_E} \Delta T_i \cdot \Delta x \cdot \rho_i \cdot c_i, \\ \text{жировой слой } n_E + 1 \leq i \leq n_F, Q_{AF} &= \sum_{i=n_E+1}^{n_F} \Delta T_i \cdot \Delta x \cdot \rho_i \cdot c_i, \\ \text{слой мышц } n_F + 1 \leq i \leq n_{BS}, Q_{AM} &= \sum_{i=n_F+1}^{n_{BS}} \Delta T_i \cdot \Delta x \cdot \rho_i \cdot c_i. \end{aligned} \quad (20)$$

где n_E, n_F, n_{BS} число участков, расположенных между наружной поверхностью и внутренней границей слоя эпителия, жирового слоя и оболочки тела пациента, соответственно. Часть отведенной теплоты получена за счет внутренних источников в слое эпителия и мышц, теплоты метаболизма Q_{MH} . Эта теплота учитывалась по известному значению q_v (табл.1):

$$Q_{MHE} = \tau_{max} \cdot \Delta x (n_E - 1) \cdot q_{VE}, Q_{MHM} = \tau_{max} \cdot \Delta x (n_{BS} - n_F - 1) \cdot q_{VM}, \quad (21)$$

где q_{VE}, q_{VM} – удельная теплота метаболизма эпителия и мышц соответственно, Вт/м³.

Некоторая часть отведенной теплоты поступила от ядра тела пациента. Количество полученной теплоты можно определить путем численного интегрирования мгновенных значений теплового потока, переносимого теплопроводностью через внутреннюю границу оболочки тела:

$$Q_{BC} = \int_{\tau=0}^{\tau_{max}} q_{n_{i+1}} \partial \tau, \quad (22)$$

Представление о том, что является источниками теплоты, отведенной с поверхности оболочки тела пациента, дает гистограмма (рис.5). Основная доля теплоты 55,2 % получена за счет

среднее значение потока теплоты, который должен отвести теплоноситель за одну процедуру 2,9 КВт/м². Это значение в 29 раз больше номинальной теплотворной способности человеческого организма, поэтому часто оспаривается производителями WBC устройств. Оценка запаса теплоты в тканях BS до и после процедуры, показывает, что тепловой поток к теплоносителю обеспечивается теплоемкостью тканей оболочки тела (рис. 4).

Понижение температуры поверхности BS создает условия для увеличения переноса теплоты теплопроводностью от глубоких слоев к периферии тела. В результате происходит изменение распределения температуры тканей по всей толщине BS. Количество теплоты, отведенное от разных тканей BS, определяется разностью энтальпий до и после проведения процедуры WBC. С учетом постоянства теплоемкости тканей в температурном диапазоне от -2 до 40 °C [10].

переохлаждения эпителиального слоя Q_{AE} . Теплота переохлаждения жирового слоя Q_{AF} составляет 39,8 %. Подвод теплоты от ядра тела Q_{BC} , от внутренних источников Q_{MH} в тканях оболочки тела и переохлаждения слоя мышц Q_{AM} составляют менее 2%.

Теплотворная способность организма не играет никакой роли при формировании тепловой нагрузки на систему охлаждения WBC устройства, которая определяется теплоаккумулирующей способностью тканей оболочки тела. Безопасность процедур WBC обеспечивается правильным выбором продолжительности контакта поверхности тела с криогенным газом. Система терморегуляции организма не влияет на безопасность процедур. На практике сложилось два варианта проведения процедур WBC в многоместных и одноместных установках [5]. Условия охлаждения в этих установках существенно различаются, поэтому технологию групповой и индивидуальной криотерапии WBC, следует разрабатывать отдельно. Вопреки распространенному мнению [2,16] в групповой установке площадь контакта охлаждающего газа с телом пациента составляет до 70,5 % от общей площади поверхности тела, а в индивидуальной кабине площадь контакта достигает 66 % [17].

Принципиально различается температурный режим групповой (GWBC) и индивидуальной (IWBC) криотерапии, поэтому нельзя разработать универсальные рекомендации по выбору оптимальной температуры газообразного теплоносителя. Для проведения предварительного анализа влияния температуры газа в зоне WBC на величину достигаемого позитивного эффекта можно принять допущение о том, что процедура проходит в изотермических условиях:

$$0 < \tau \leq \tau_{max}, T_1 = const, \quad (23)$$

Реализовать WBC в изотермическом режиме невозможно, так как необходимо некоторое время для входа пациента в низкотемпературную зону и выхода из нее, но исследование процессов WBC в идеальных температурных условиях позволяет сформулировать общие технологические условия эффективности.

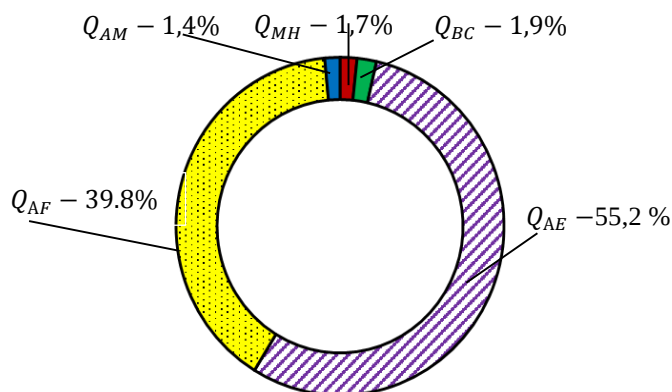


Рис.5. Источники теплоты, отведенной через поверхность оболочки тела

Fig.5. Sources of heat abstracted through the surface of the body shell

газ с температурой от 120 до 140 К [17]. При температуре 160 К ЕТ WBC процедур в 10 раз ниже максимального значения, и близка к результатам достигаемым во время водных процедур. Результаты вычислительного эксперимента по моделированию охлаждения поверхности тела газом с температурой 160 К (-110°C) идеально совпадают с результатами тестов, выполненных спортивными врачами [10,11,12], которые, сопоставляя лечебное действие WBC процедур при температуре -110°C и водных ванн с температурой 8°C, не выявили никаких преимуществ WBC.

По мере увеличения температуры газообразного теплоносителя интенсивность отвода теплоты от поверхности BS снижается, а безопасная продолжительность охлаждения возрастает. При температуре газа выше 150 К, опасность переохлаждения ядра тела ($T_f \rightarrow 309$ К) возникает раньше, чем поверхность оболочки тела переохладится до уровня -2°C. Причиной прекращения процедур WBC становится нарушение условия $T_f \geq 309$ К.

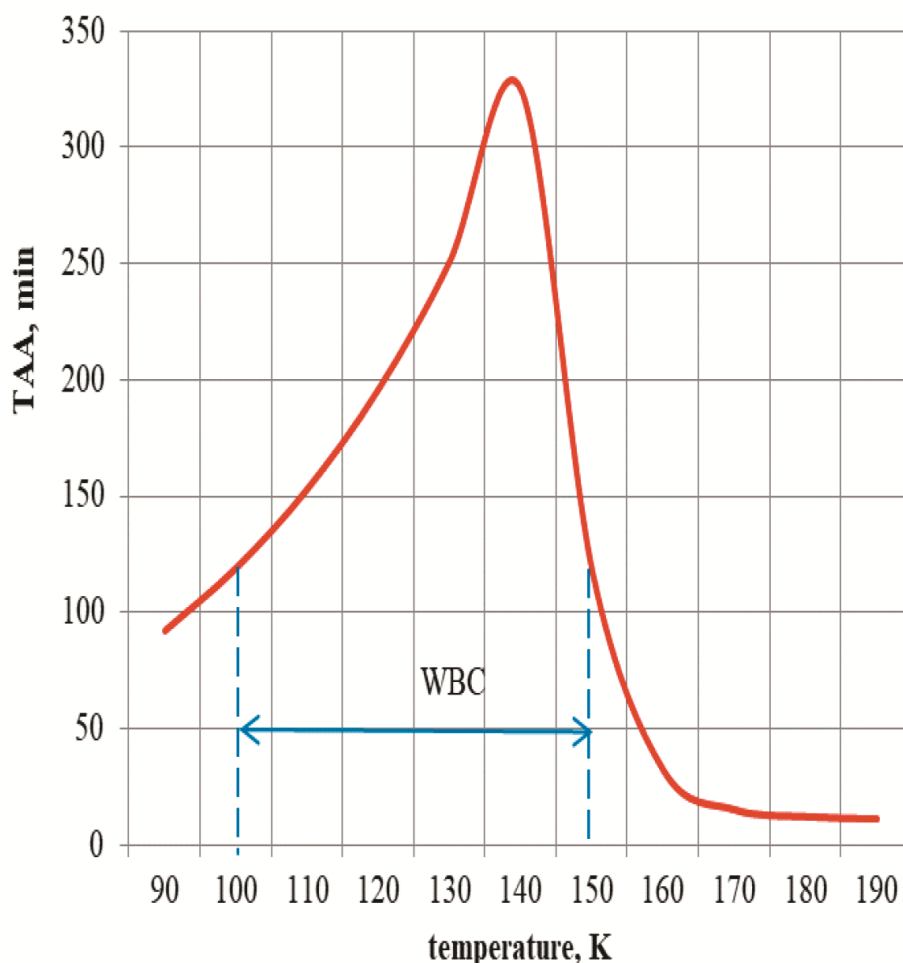


Рис. 6. Зависимость продолжительности анальгетического эффекта от температуры газа
Fig. 6. The dependence of the duration of the analgesic effect on the gas temperature

При этом температура поверхности оболочки тела остается на достаточно высоком уровне ($T_s \geq 275$ K (2°C)), из-за чего холодные рецепторы кожи не испытывают существенного раздражения и, накопление позитивного эффекта WBC идет крайне медленно. Описанная картина идентична тому, что наблюдается в момент завершения процедуры водной гипотермии.

В условиях изотермического охлаждения тела газом с температурой 160 K (-110°C) расчетная продолжительность процедуры WBC составляет 207 с. За это время температура поверхности BS снижается только до 275 K. В реальных условиях процедуры WBC в установках с минимальной температурой 160 K (-110°C) не обеспечивают постоянства температуры газа, поэтому температура поверхности BS после процедуры гораздо выше расчетной и составляет $15 - 20^\circ\text{C}$ [10-12]. Такую температуру на поверхности кожи можно получить, используя водные ванны с температурой $+8^\circ\text{C}$, поэтому сомнения авторов в целесообразности использования криогенных технологий вполне оправданы.

Вычислительные эксперименты на математической модели BS тела человека показали, что при увеличении температуры теплоносителя от 90 до 190 K, безопасная продолжительность пребывания пациента в зоне WBC возрастает от 54 до 237 с [5].

При температуре 140 K безопасная экспозиция охлаждения составляет 161 с. Практика использования WBC показала, что наряду с максимальной продолжительностью охлаждения, необходимо ограничивать и минимальную продолжительность пребывания пациентов в криотерапевтической установке [17].

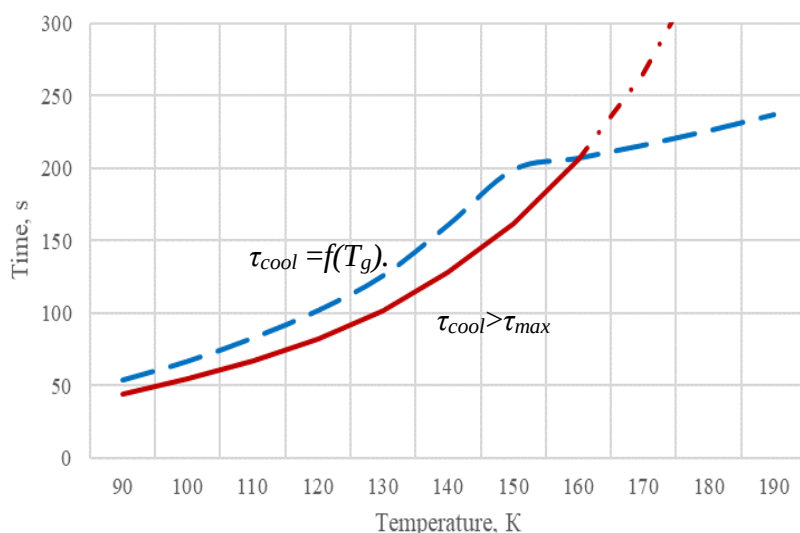


Рис.7. Расчетная продолжительность процедуры WBC (τ_{max}) и фазы охлаждения (τ_{cool}) при разных температурах газа
 Fig.7. The estimated duration of the WBC procedure (τ_{max}) and the cooling phase (τ_{cool}) at different gas temperatures

В процедуре WBC есть достаточно большой период, когда позитивный эффект не формируется.

На эту фазу процедуры приходится почти 80 %, но 93 % позитивного эффекта формируется после ее завершения. Первая фаза процедуры WBC обеспечивает снижение температуры поверхности кожи до температуры $T_S=275K$, поэтому она получила название - фаза охлаждения (τ_{cool}). Очевидно, что продолжительность процедуры WBC должна быть больше продолжительности фазы охлаждения, но меньше времени нарушения условий безопасности $\tau_{cool} < \tau < \tau_{max}$. Вторая, эффективная,

фаза процедуры:

$$\tau_{EP} = \tau_{max} - \tau_{cool}, \quad (24)$$

обеспечивает формирование основного позитивного результата, чем больше продолжительность эффективной фазы, тем больше эффект процедуры.

Расчетные зависимости безопасной экспозиции WBC τ_{max} и продолжительности фазы охлаждения τ_{cool} от температуры газа T_g (рис.7), показывают, что повышение температуры газа от 90 до 150 K увеличивает эффективную фазу процедуры. При температурах выше 160 K расчетная продолжительность фазы охлаждения превышает безопасную экспозицию WBC.

Численные эксперименты на математической модели оболочки тела человека позволили сформулировать общие представления о технологических основах эффективного WBC.

При разработке технологических рекомендаций по проектированию установок для реализации методов GWBC или IWBC надо учитывать алгоритм изменения температуры газа контактирующего с поверхностью тела пациента.

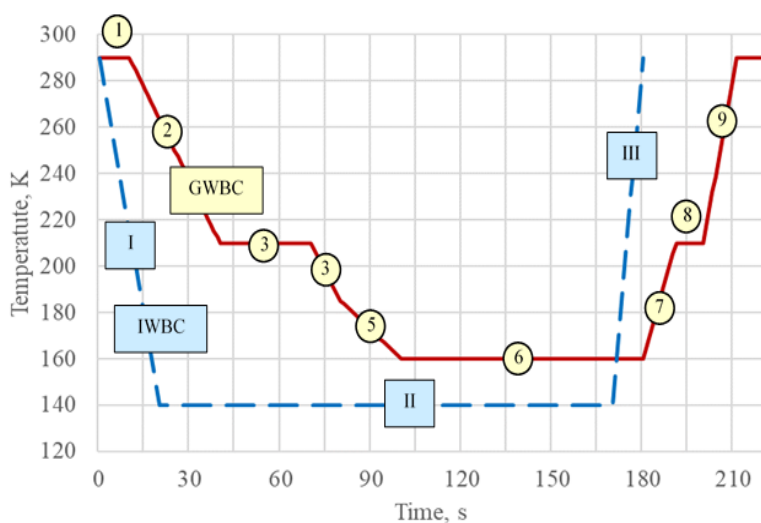


Рис.8. Примерный алгоритм изменения температуры охлаждающего газа при реализации технологии GWBC и IWBC
 Fig.8. An approximate algorithm for changing the temperature of the cooling gas in the implementation of GWBC and IWBC technology

Установки для GWBC состоят из двух или трех теплоизолированных камер с разной температурой воздуха [3]. Пациенты проходят из процедурного кабинета в камеру с минимальной температурой (МС) и обратно, через шлюзовые камеры (ЛС). В большинстве современных установок в основной камере поддерживается температура 160K, а в шлюзовой камере 210 K. В момент входа (выхода) пациентов в ЛС или МС через входные люки проникает более теплый воздух из смежных объемов. Из-за этого температура воздуха в объеме МС повышается, как минимум на 25 K. С поверхности тела каждого

пациента в объем МС выделяется от 3,5 до 4,5 кВт теплоты. Поэтому действительный температурный режим GWBC зависит не только от выбора номинальных значений температуры в МС и ЛС, но и от мощности системы охлаждения. Температура охлаждающего газа изменяется по сложному графику, который состоит минимум из 8 этапов (рис.8).

Алгоритм изменения температуры газа при IWBC значительно проще.

Пациент входит в кабину, заполненную атмосферным воздухом, который быстро вытесняется парами жидкого азота с температурой не выше 140 К. Время снижения температуры газа в кабине IWBC до оптимального уровня зависит от мощности системы охлаждения и составляет не менее 20 с.

При проектировании систем охлаждения зоны WBC необходимо адекватно оценивать мощность тепловых потоков, которые надо компенсировать. Выше показано, что во время процедуры WBC с поверхности тела пациента выделяется 440 кДж/м² теплоты, а средний тепловой поток от тела к криогенному теплоносителю изменяется от 3,5 до 2,3 кВт/м² (табл. 2).

С учетом площади поверхности тела (1,6 м²) [5] подвод теплоты от одного пациента составит 700 кДж, средняя мощность подвода теплоты 4,6 кВт. Только на отвод теплоты, отведенной от поверхности тела одного пациента газом с температурой $T_g = 140$ К надо затратить не менее 2,7 кг жидкого азота:

$$G_{LN} = \frac{Q_{HC}}{[r_{LN} + c_{LN}(T_g - T_{LN}^*)]} \quad (24)$$

где r_{LN} теплота парообразования азота, $r_{LN} = 199$ кДж/кг, c_{LN} – теплоемкость паров азота, $c_{LN} = 1,002$ кДж/кг, T_{LN}^* – температура кипения жидкого азота при атмосферном давлении, $T_{LN}^* = 78$ К.

Расчетные затраты азота на отвод теплоты от поверхности тела в 2,7 раза выше, чем в современных установках для WBC с азотным охлаждением [5,8].

Для восстановления эффективности WBC надо обеспечить криотерапевтические установки достаточно мощными системами охлаждения.

Подвод теплоты от пациентов Q_{HC} составляет только полезную часть тепловой нагрузки на систему охлаждения. Кроме этого необходимо компенсировать подвод теплоты от стенок теплового ограждения зоны WBC Q_{TI} и теплоту, которую вносят в объем процедурной кабины потоки теплого газа из смежных объемов (шлюза или окружающей среды) Q_{GC} . Суммарная тепловая нагрузка определится как сумма теплоты полученной от разных источников:

$$Q_{\Sigma} = Q_{HC} + Q_{TI} + Q_{GC}. \quad (25)$$

Энергетическая эффективность конструкции установки для WBC можно оценить по доле полезной нагрузки на систему криостатирования, тепловому коэффициенту полезного действия:

$$\eta_H = Q_{HC} / Q_{\Sigma}. \quad (26)$$

Для оценки затрат энергии и выбора оптимальной технологии процедур WBC необходимо провести численный эксперимент на математической модели криотерапевтического устройства.

Поверхность тела пациента площадью F_1 охлаждается газообразным теплоносителем, который заполняет объем теплового ограждения V_3 . С поверхности тела пациента отводится поток теплоты q_{HC} . От поверхности теплового ограждения площадью F_3 к газу в объеме V_3 поступает тепловой поток q_{TI} . Движение потоков газа, связанное с перемещением пациентов и изменением плотности среды при колебаниях температуры, создает дополнительный источник тепловой нагрузки q_{GC} . Для сохранения температуры газа в зоне WBC на постоянном уровне необходимо обеспечить отвод суммарной теплоты q_{Σ} к системе криостатирования.

Для формирования одномерной модели необходимо отнести все показатели системы к единице объема зоны WBC. Удельная теплопередающая поверхность тепловой изоляции f_3 и тела пациента f_1 определяются с учетом объема процедурной кабины V_3 :

$$f_3 = F_3 / V_3, \quad f_1 = F_1 / V_3, \quad (27)$$

Удельный подвод теплоты от тела пациента и теплового ограждения вычисляется с учетом температуры их поверхности:

$$q_{TI} = \alpha_{3-2} f_3 (T_3 - T_2), \quad q_{HC} = \alpha_{1-2} f_1 (T_1 - T_2), \quad (28)$$

где α_{3-2} и α_{1-2} – коэффициенты теплоотдачи от ограждения и тела пациента соответственно, T_1, T_3 – температуры поверхности тела и ограждения, T_2 – температура газа теплоносителя.

У аппаратов, предназначенных для реализации технологий GWBC и IWBC, удельные характеристики имеют большие различия. В многоместных установках плотность размещения пациентов составляет 0,4-0,7 чел/м³, а удельный объем свободного пространства V_0 составляет не менее 98%. Удельная площадь поверхности тела пациента 0,6-1,0 м²/м³, площадь теплового ограждения зоны WBC составляет 2,4 – 3,0 м²/м³. Низкая компактность размещения пациентов в многоместных установках необходима для того, чтобы они могли перемещаться из одной низкотемпературной камеры в другую.

В одноместных криосаунах плотность размещения пациентов достигает 2,0 чел/м³, удельная площадь поверхности тела пациента 3,2 м²/м³, площадь теплового ограждения зоны WBC составляет 6,4 м²/м³, удельный объем свободного пространства составляет 84% [5]. Высокая компактность размещения пациента обеспечивается за счет того, что во время процедуры пациент не перемещается, поэтому размеры кабины сопоставимы с размерами тела пациента.

Подвод теплоты с потоками газа определяется интенсивность конвективного переноса массы теплого газа в объем зоны WBC. Подвод теплоты газовой конвекцией через границу зоны WBC определится из выражения:

$$q_{GC} = c_p g_G (T_g - T_2), \quad (29)$$

где g_G – удельный перенос массы газа в объем зоны WBC, кг/(м³ с), c_p – теплоемкость газа, кДж/(кг К), T_g – температура газа, поступающего в зону WBC.

Большие потоки теплоты с потоками газа поступает в зону WBC при входе и выходе пациентов. Например, шлюзовая камера многоместной установки и кабина одноместной криосауны в момент входа пациентов заполняются атмосферным воздухом.

В шлюзовую кабину вместе с атмосферным воздухом поступает 93 кДж/м³ теплоты. При восстановлении температуры до номинального уровня, плотность воздуха в шлюзовой кабине возрастает на 40 %, это сопровождается поступлением из атмосферы дополнительного количества воздуха, который вносит еще 27 кДж/м³ теплоты. За одну процедуру в объем из шлюза поступает 120 кДж/м³ теплоты, переносимой газовой конвекцией.

Основу математической модели зоны WBC составляет одномерное:

$$\rho \frac{\partial h}{\partial \tau} = \frac{\partial q_x}{\partial x} + q_v, \quad (30)$$

где q_v – теплота от внутренних источников :

$$q_v = q_\Sigma + q_{HC} + q_{TI} + q_{GC}. \quad (31)$$

В идеальном случае $q_v = 0$, так как $q_\Sigma = -(q_{HC} + q_{TI} + q_{GC})$, т.е. система охлаждения компенсирует подвод теплоты в единицу объема зоны WBC.

Для учета материального баланса в математической модели зоны WBC используется уравнение неразрывности потока:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{\partial g_x}{\partial x} = 0. \quad (32)$$

Так, перенос теплоты теплопроводностью газа мал, выражение (30) упрощается и может быть преобразовано путем замены производных разностными приближениями:

$$\rho \frac{\Delta h}{\Delta \tau} = q_v, \quad h' = h + \frac{q_v \Delta \tau}{\rho}. \quad (33)$$

Численное решение уравнения неразрывности (32) позволяет учитывать подвод массы газа для компенсации изменения плотности:

$$g'_x = g_x + \frac{(\rho' - \rho) \Delta x}{\Delta \tau}. \quad (34)$$

Уравнения (28, 33, 34) позволяют проанализировать процессы, протекающие в зоне WBC во время реализации индивидуальной или групповой технологии.

Для выполнения вычислительного эксперимента надо принять алгоритм изменения температуры охлаждающего газа для IWBC и GWBC.

Сформулировать температурный алгоритм для процесса IWBC относительно просто. Примем время заполнения зоны криогенным газом (рис.9) $\tau_I=20$ с, $\tau_{II}=150$ с, $\tau_{III}=10$ с, а температуру газа в изотермической фазе II $T_{II}=140$ К.

Удельные теплопередающие поверхности источников теплоты $f_I=3,2$ м²/м³, $f_3=6,4$ м²/м³, удельный объем свободного пространства составляет 84% [17].

При моделировании процесса IWBC вычисляются потоки теплоты от различных источников (28, 29) и определяются интегральный подвод теплоты:

$$Q_{HC} = f_2 \int_{\tau=0}^{\tau=\tau_{max}} q_{HC} \partial \tau, \quad Q_{TI} = f_3 \int_{\tau=0}^{\tau=\tau_{max}} q_{TI} \partial \tau, \quad Q_{GC} = \int_{\tau=0}^{\tau=\tau_{max}} q_{GC} \partial \tau. \quad (35)$$

По уравнениям (25, 26) вычисляется суммарная тепловая нагрузка на систему охлаждения и тепловой коэффициент полезного действия.

Предполагается, что система охлаждения покрывает все виды тепловой нагрузки, поэтому удельная мощность электропривода рефрижератора может быть определена по тепловой нагрузке и значению холодильного коэффициента на текущем температурном уровне:

$$N_5 = Q_\Sigma / \varepsilon_5, \quad \text{где} \quad \varepsilon_5 = f(T_g), \quad (36)$$

где ε_5 - холодильный коэффициент, отношение отведенной теплоты к затратам энергии в рефрижераторе, на температурном уровне 140К $\varepsilon_5=0,25$ Вт/Вт.

По мгновенным значениям расчетной мощности рефрижератора системы вычисляется удельный расход электроэнергии на охлаждение зоны IWBC за процедуру:

$$Q_5 = \int_{\tau=0}^{\tau=\tau_{max}} N_5 \partial \tau. \quad (37)$$

Определяем удельные значения расхода и затрат жидкого азота на процедуру:

$$g_{LN} = \frac{q_\Sigma}{[r_{LN} + c_{LN}(T_g - T_{LN})]}, \quad G_{LN} = \int_0^{\tau_{max}} g_{LN} \partial \tau \quad (38)$$

Выполнение описанных выше вычислений позволяет оценить энергетическую эффективность групповой и индивидуальной технологии WBC.

Обсуждение результатов. В эксперименте по моделированию процесса GWBC использован временной алгоритм, представленный на графике (рис. 8), номинальная температура газа в основной кабине составляла 130 К. Рассчитывались энергетические показатели для основной и шлюзовой камер

Результаты численного эксперимента по моделированию процесса GWBC сведены в табл. 3. Энергетическая эффективность технологии оценивалась по сумме затрат энергии в основной и шлюзовой камере.

Проведение процедур WBC требует отвода большого количества теплоты из низкотемпературной зоны. Удельный подвод теплоты в зону IWBC составил $Q_\Sigma=2012$ кДж/м³. Учитывая малую продолжительность процедуры ($\tau_{max}=180$ с), средняя тепловая нагрузка на систему охлаждения зоны IWBC составила 11,8 кВт/м³.

Учитывая то, что эту тепловую нагрузку надо отвести на температурном уровне 140 К расчетная мощность системы охлаждения низкотемпературной зоны составила 45,3 кВт/м³. Рефрижераторы такой мощности достаточно дороги, поэтому экономически оправданно использовать азотную систему охлаждения зоны WBC. Удельные затраты жидкого азота составляют 7,503 кг/м³.

Таблица 3. Энергетические характеристики аппаратов для IWBC и GWBC
Table 3. Energy performance of devices for IWBC and GWBC

Показатели Indicators	IWBC	GWBC		
		кабина Cabin	шлюз Gateway	всего Total
Характеристики зоны WBC Characteristics of the WBC zone				
f_1 , м ² /м ³	3,2	0,62	0,62	
f_2 , м ² /м ³	6,4	2,4	2,4	
V_0 %	0,84	0,97	0,97	
Подвод теплоты в зону WBC Heat supply to the WBC zone				
q_{Σ}^{max} , кВт/м ³	33	7,43	3,97	
Q_{Σ} , кДж/м ³	2012	422	144	566
Q_{GC} , кДж/м ³	92	142	96	238
Q_{HC} , кДж/м ³	1427	246	33	279
Q_{TL} , кДж/м ³	493	33	14	47
Q_{Σ}/τ_{max} , кВт/м ³	11,8	2,76	1,18	3,94
Затраты электроэнергии и жидкого азота на охлаждение The cost of electricity and liquid nitrogen for cooling				
N_5^{max} , кВт/м ³	136	11,04	4,72	15,76
Q_5 , кВт час/м ³	2,15	0,50	0,07	0,57
Q_5/τ_{max} , кВт/м ³	45,3	11,04	4,72	15,76
G_{LN} кг/м ³	7,503	1,56	0,42	2,02
G_{LN}/τ_{max} , кг/(с·м ³)	0,04	0,0029	0,009	0,0038

Энергетические показатели зоны GWBC гораздо ниже. Удельный подвод теплоты $Q_{\Sigma}=566 \text{ кДж}/\text{м}^3$, средняя тепловая нагрузка на систему охлаждения $15,6 \text{ кВт}/\text{м}^3$, мощность системы охлаждения определяется суммой притока теплоты в основную кабину и шлюз.

Из-за низкой компактности размещения пациентов в процедурной зоне, тепловой коэффициент полезного действия GWBC, доля полезной тепловой нагрузки от поверхности тел пациентов составляет всего 49%.

В одноместной установке доля полезной нагрузки составляет 71%, что свидетельствует о более рациональном расходовании энергии.

Данные табл. 3 не позволяют отдать однозначное предпочтение той или иной технологии. Это связано с тем, что все показатели отнесены к единице объема зоны WBC, в то время как технологическая задача технологического процесса состоит в охлаждении поверхности оболочки тела пациента.

Если рассчитать удельные значения тепловой нагрузки и затраты энергии на охлаждение единицы поверхности оболочки (табл. 4), преимущества технологии IWBC становятся неоспоримыми.

По всем энергетическим показателям технология IWBC в 1,5 раза эффективнее процесса GWBC. Удельные энергетические показатели установки для IWBC значительно лучше, чем и у GWBC аппарата.

Таблица 4. Энергетические характеристики аппаратов для IWBC и GWBC
Table 4. Energy performance of devices for IWBC and GWBC

Показатели Indicators	IWBC	GWBC
$Q_{\Sigma}/f_1, \text{кДж}/\text{м}^2$	629	913
$Q_5/f_1, \text{кВт час}/\text{м}^2$	0,67	0,92
$G_{LN}/f_1, \text{кг}/\text{м}^2$	2,34	3,24

Суммарная тепловая нагрузка при индивидуальной криотерапии почти в 1,5 раза ниже, что обеспечивает адекватное снижение удельных затрат электроэнергии или жидкого азота.

Затраты отнесенные к единице поверхности объекта WBC позволяют рассчитать минимальные энергетические требования к индивидуальным и групповым установкам.

С учетом площади поверхности оболочки одного пациента можно оценить затраты жидкого азота на одну процедуру в одностойной и групповой установке на 5 человек.

Для одностойной установки расход азота составит 3,75 кг, а для групповой 26 кг на процедуру. Результаты расчета для одностойной установки чуть лучше показателей действующих криосаун российского производства. А вот для пятиместной установки польского производства «KR-2005» заявленные производителем затраты жидкого азота составляют всего 10 кг на процедуру [8], т.е. в 2,6 раза менее расчетного результата.

На практике такой дефицит в снабжении криоагентом выражается в нарушении температурного режима зоны WBC и уменьшении эффекта процедур.

Вывод.

1. В практической деятельности сложилось два варианта проведения процедур WBC, которые существенно различаются по энергозатратам и температурному режиму.
2. Одностойные установки разрабатывались и производились на основе теплофизической теории WBC, поэтому их конструкция и режим работы в наибольшей степени соответствуют требованиям достижения максимального лечебного эффекта при соблюдении условий безопасности пациентов.
3. Многостойные аппараты для WBC являются продуктом архаичного развития, поэтому не обеспечивают условий эффективного криовоздействия из-за неэффективного температурного режима и низкой энерговооруженности.
4. Для восстановления эффективности групповой криотерапии надо кардинально модернизировать установки. Перейти на азотное охлаждение зоны WBC и в 2,5 раза увеличить затраты жидкого азота. Такая модернизация потребует значительных затрат и существенно ухудшит экономические показатели оборудования, поэтому вероятность ее реализации крайне мала.
5. Учитывая то, что индивидуальная технология проведения процедур сочетает высокую лечебную эффективность с относительно низкими затратами энергии, а также обеспечивает традиционный для медицины принцип индивидуальности лечения следует популяризировать результаты исследования для постепенного распространения одностойных установок во всех медицинских учреждениях.

Библиографический список:

1. Rymaszewska J., Urbańska K. M., Szcześniak D., Stańczykiewicz B., Tryпка E., Zabłocka A. The improvement of memory deficits after whole-body cryotherapy – the first report // *CryoLetters*. 2018. V.39(3). P. 166-176.
2. Polidoria G., Cuttelli S., Hammond L., Langdon D., Legrande F., Taiara R., Boyer F. C., Costello J. T. Should Whole Body Cryotherapy sessions be differentiated between women and men? A preliminary study on the role of the body thermal resistance // *Medical Hypotheses*. 2018. V.120. P. 60-64.
3. Krueger M., Costello J. T., Achtzehn S., Dittmar K. H., Mester J. Whole-body cryotherapy (–110°C) following high-intensity intermittent exercise does not alter hormonal, inflammatory or muscle damage biomarkers in trained males // *Cytokine*. 2018. V. 107: P. 51-58.
4. Greenwald, E., Christman, M., Penn, L., Brinster, N., Liebman, T. Cold panniculitis: Adverse cutaneous effect of whole-body cryotherapy // *JAAD Case Rep*. 2018. V. 4(4). P. 344-345.
5. Баранов А.Ю. Низкотемпературные установки медицинского назначения. Ч. 1. Аппараты для общего криотерапевтического воздействия: учеб. пособие. – СПб: Университет ИТМО; ИХиБТ, 2016. – 178 с
6. Yamauchi Y., Yamauchi T., Miura K. The analgesic effects of –170°C whole body cryotherapy on rheumatoid arthritis (R.A.) // *Pain*. 1987. V. 30(1). 261 p.
7. Yamauchi T., Yamauchi Y., Miura K., Cooper A. Clinical effects of –170°C whole body cryotherapy (W.B.C.T.) on steroid dependant chronic diseases // *Journal of Steroid Bio-chemistry*. 1986. V. 25(1). 25 p.
8. Zagrobelny Z. *Krioterapiamiejscowa I ogolnostrojowa*. Wroclaw 2003. 189 p.
9. Baranov A. Y., Malysheva T. A. Experimental verification of patients' skin-surface temperature measurements before and after whole body cryotherapy // *Exercise therapy and Sports Medicine*. 2016. V. 136(4). P. 40-46.
10. Маханёк А.А., Левин М.Л., Драгун В.Л. Теплофизические аспекты общей газовой криотерапии // *Вести НАН Беларуси. Сер. физ.-техн. наук*. 2011. № 3. С. 59–71.

11. Carrard J., Lambert A., Genné D. Transient global amnesia following a whole-body cryotherapy session // *BMJ Case Rep.* 2017. bcr-2017-221431.
12. Poppendieck W., Faude O., Wegmann M., Meyer T. Cooling and Performance Recovery o Trained Athletes: A Meta-Analytical Review // *International Journal of Sports Physiology and Performance.* 2013. V. 8. P. 227-242.
13. Шиман А.Г., Кирьянова В.В., Максимов А.В., Баранов А.Ю. Клинико-физиологические аспекты применения криотерапии // *Вестник СПб государственной медицинской академии им. И.И. Мечникова.* 2001. № 1. С. 27–35.
14. Vieira A., Bottaro M., Ferreira-Junior J.B., Vieira C., Cleto V.A., Cadore E.L., Simões H.G., Carmo J.D., Brown L.E. Does whole-body cryotherapy improve vertical jump recovery following a high-intensity exercise bout? // *Open Access J Sports Med.* 2015. V. 6. P. 49–54.
15. Westerlund T., Oksa J., Smolander J., Mikkelsen M. Thermal responses during and after whole-body cryotherapy // *Journal of Thermal Biology.* 2003. V. 28(8). P. 601–608.
16. Savica M., Fonda B., Sarabona N., Actual temperature during and thermal response after whole-body cryotherapy in cryo-cabin // *Journal of Thermal Biology.* 2013. V. 38(4). P. 186-191.
17. Баранов А.Ю., Шестакова О.А., Василёнок А.В. Двадцать лет клинической эксплуатации отечественных аппаратов для общего криотерапевтического воздействия // *Холодильная техника.* 2018. №5. С. 2-7.
18. Engel P., Fricke R., Taghawinejad M., Hildebrandt G. Ganzkörperkaltebehandlung bei patienten mit chronischer Polyarthrititis // *Phys Med Baln Med Klim.* 1989. V. 18. P. 37-43.
19. Чернышев И.С. Современные аспекты криомедицины. Медицинская криология: Международный сб. трудов, Вып.3/ под ред. В.И. Коченова. – Н. Новгород, 2002. С. 57–69.
20. Цыганов Д.И. Криомедицина: процессы и аппараты. М: Сайнс-Пресс; 2011. 304 с.

Reference:

1. Rymaszewska J., Urbańska K. M., Szcześniak D., Stańczykiewicz B., Trypka E., Zabłocka A. The improvement of memory deficits after whole-body cryotherapy – the first report. *CryoLetters.* 2018;39(3):166-176.
2. Polidoria G., Cuttella S., Hammond L., Langdon D., Legrande F., Taiara R., Boyer F.C., Costello J.T. Should Whole Body Cryotherapy sessions be differentiated between women and men? A preliminary study on the role of the body thermal resistance. *Medical Hypotheses.* 2018;120:60-64.
3. Krueger M., Costello J.T., Achtzehn S., Dittmar K.H., Mester J. Whole-body cryotherapy (–110°C) following high-intensity intermittent exercise does not alter hormonal, inflammatory or muscle damage biomarkers in trained males. *Cytokine.* 2018;107:51-58.
4. Greenwald, E., Christman, M., Penn, L., Brinster, N., Liebman, T. Cold panniculitis: Adverse cutaneous effect of whole-body cryotherapy. *JAAD Case Rep.* 2018;4(4):344-345.
5. Baranov A.Yu. Nizkotemperaturnye ustanovki meditsinskogo naznacheniya. Ch. 1. Apparaty dlya obshchego krioterapevticheskogo vozdeistviya [Low-temperature installations for medical purposes. Part 1. Apparatus for general cryotherapy treatment. St. Petersburg, University ITMO; IHBT, 2016. 178 p.(In Russ.)]
6. Yamauchi Y., Yamauchi T., Miura K. The analgesic effects of –170°C whole body cryotherapy on rheumatoid arthritis (R.A.); *Pain.* 1987;30(1):261 p.
7. Yamauchi T., Yamauchi Y., Miura K., Cooper A. Clinical effects of –170°C whole body cryotherapy (W.B.C.T.) on steroid dependant chronic diseases. *Journal of Steroid Biochemistry.* 1986;25(1): 25 p.
8. Zagrobelny Z. Krioterapiamiejscowa I ogolnostrojowa. Wroclaw 2003. 189 p.
9. Baranov A.Y., Malysheva T.A. Experimental verification of patients' skin-surface temperature measurements before and after whole body cryotherapy. *Exercise therapy and Sports Medicine.* 2016;136(4):40-46.
10. Makhaniok A.A., Levin M.L., Dragun V.L. Teplofizicheskie aspekty obshcheigazovoikrioterapii [Thermophysigal aspects gas cryotherapy]. *Izvestiya Natsional'noi akademii nauk Belarusi, seriya fiziko-tekhnicheskikh nauk* = Founded by the national academy of sciences of Belarus, Physico-Technical Series, 2011;3:59–71.
11. Carrard J., Lambert A., Genné D. Transient global amnesia following a whole-body cryotherapy session. *BMJ Case Rep.* 2017;2017:bcr-2017-221431.
12. Poppendieck W., Faude O., Wegmann M., Meyer T. Cooling and Performance Recovery o Trained Athletes: A Meta-Analytical Review. *International Journal of Sports Physiology and Performance.* 2013;8:227-242.
13. Shiman A.G., Kiryanov V.V., Maksimov A.V., Baranov A.Y. Kliniko-fiziologicheskie aspekty primeneniya krioterapii [Clinito-physiological aspects of the application of cryotherapy]. *Vestnik SPb Gos. Med. Akademii im. I. I. Mechnikova.* = St. Petersburg Herald State Medical Academy II Mechnikov 2001;1:27-35. (In Russ.)]
14. Vieira A., Bottaro M., Ferreira-Junior J.B., Vieira C., Cleto V.A., Cadore E.L., Simões H.G., Carmo J.D., Brown L.E. Does whole-body cryotherapy improve vertical jump recovery following a high-intensity exercise bout? *Open Access J Sports Med.* 2015;6:49-54.
15. Westerlund T., Oksa J., Smolander J., Mikkelsen M. Thermal responses during and after whole-body cryotherapy. *Journal of Thermal Biology.* 2003;28(8):601–608.
16. Savica M., Fonda B., Sarabona N., Actual temperature during and thermal response after whole-body cryotherapy in cryo-cabin. *Journal of Thermal Biology.* 2013;38(4):186-191.

17. Baranov A.Yu., Shestakova O.A., Vasilenok A.V. Dvadsat' let klinicheskoi ekspluatatsii otechestvennykh apparatov dlya obshchego krioterapevticheskogo vozdeistviya [Twenty years of clinical operation of domestic devices for general cryotherapeutic effects. Kholodil'naya tekhnika = Refrigeration technique 2018;5:2-7. (In Russ.)]
18. Engel P., Fricke R., Taghawinejad M., Hildebrandt G. Ganzkörperkaltebehandlung bei patienten mit chronischer Polyarthrit. Phys Med Baln Med Klim. 1989;18:37-43.
19. Chernyshev I.S. Kriogennaya aeroterapiya v sovremennoi meditsine [Cryogenic aerotherapy in modern medicine. Moscow 2010. 26 p. (In Russ.)]
20. Tsyganov D.I. Kriomeditsina: Protsessy i apparaty [Cryomedicine: processes and devices. Moscow, SAINS-PRESS, 2011. 304 p. (In Russ.)]

Сведения об авторах:

Баранов Александр Юрьевич - доктор технических наук, профессор.

Василенок Анна Владимировна – аспирант.

Соколова Екатерина Владимировна - старший преподаватель.

Шестакова Ольга Александровна - ассистент.

Information about the authors:

Alexander Yu. Baranov - Dr. Sci. (Technical), Prof.

Anna V. Vasilenok - Graduate Student.

Ekaterina V. Sokolova - Senior Lecturer.

Olga A. Shestakova - Assistant.

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 12.07.2018.

Принята в печать 15.09.2018.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 12.07.2018.

Accepted for publication 15.09.2018.

Для цитирования: Бекренев Н.В., Злобина И.В. Изучение влияния микроволнового излучения на теплофизические характеристики отвержденных полимерных композиционных материалов, армированных углеродными волокнами Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2018; 45 (3): 58-67. DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-3-58-67

For citation: Bekrenev N.V., Zlobina I.V. Studying the influence of microwave radiation on the thermophysical characteristics of reversed polymer composition materials reinforced by carbon fibers. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2018; 45 (3): 58-67. (in Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-3-58-67

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621-039-419; 620.22-419; 537.868

DOI: 10.21822/2073-6185-2018-45-3-58-67

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОТВЕРЖДЕННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ, АРМИРОВАННЫХ УГЛЕРОДНЫМИ ВОЛОКНАМИ

Бекренев Н.В.¹, Злобина И.В.²

^{1,2}Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.,

^{1,2}2410054, г. Саратов, ул. Политехническая 77, Россия,

¹e-mail: nikolaj.bekrenev@yandex.ru, ²e-mail: irinka_7_@mail.ru

Резюме. Цель. Целью исследований является изучение влияния СВЧ электромагнитного поля на теплофизические характеристики ПКМ, армированных углеродными волокнами, как одного из факторов, свидетельствующих об определенном переструктурировании материала, приводящем к изменению его эксплуатационных свойств. **Метод.** Применение модифицирующего упрочняющего воздействия, не приводящего к чрезмерному деструктурирующему разогреву материалов. **Результат.** На основе анализа научно-технической литературы и тенденций развития технических транспортных и энергетических систем выявлен стабильный рост потребления в их конструкциях волокнистых полимерных композиционных материалов (ПКМ). Показана перспективность применения воздействия микроволнового излучения (СВЧ электромагнитного поля) на формирование требуемых свойств изделий из ПКМ и целесообразность изучения механизмов взаимодействия микроволнового излучения со структурой отвержденных ПКМ. Выполнены экспериментальные исследования теплофизического взаимодействия ПКМ, армированных углеродными волокнами, с СВЧ электромагнитным полем частотой 2450 МГц. **Вывод.** Установлен факт более интенсивного нагрева образцов большей толщины и большей их экранирующей способности. При исследовании модифицированным методом Паркера теплофизических параметров ПКМ, подвергнутых предварительной обработке в СВЧ электромагнитном поле, установлено увеличение при определенных режимах воздействия коэффициентов температуро- и теплопроводности на 20%, что свидетельствует об увеличении адгезионных связей в межфазных зонах и повышении плотности структуры. Данный факт может быть использован при разработке технологий модифицирования изделий из ПКМ, предназначенных для работы в условиях повышенных температурных градиентов, что позволит снизить величину термических напряжений.

Исследования выполнены при поддержке гранта РФФИ № 17-03-00720 «Методология оптимизационного микроконструирования композиционных материалов для объектов сложной формы повышенной динамической прочности, послойно формируемых электротехнологическими методами».

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, физико-механические свойства, микроволновое излучение, температура, температуропроводность, теплопроводность, кинетика нагрева, равномерность нагрева, квазиструктурирование, отвержденное состояние

TECHNICAL SCIENCE
POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL MECHANICAL ENGINEERING

STUDYING THE INFLUENCE OF MICROWAVE RADIATION ON THE THERMOPHYSICAL CHARACTERISTICS OF REVERSED POLYMER COMPOSITION MATERIALS REINFORCED BY CARBON FIBERS

Nikolaj V. Bekrenev¹, Irina V. Zlobina²

¹⁻²Yuri Gagarin State Technical University of Saratov,

¹⁻² 77 Politehnicheskaya Str., Saratov 410054, Russia,

¹e-mail: nikolaj.bekrenev@yandex.ru, ²e-mail: irinka_7_@mail.ru

Abstract. Objectives. The aim of the research is to study the influence of the microwave electromagnetic field on the thermophysical characteristics of PCM reinforced with carbon fibers as one of the factors indicating a certain restructuring of the material, leading to a change in its operational properties. **Method.** The use of modifying hardening effects that do not lead to excessive destructuring heating of materials. **Result.** Based on the analysis of scientific and technical literature and trends in the development of technical transport and energy systems, a steady increase in the consumption of fibrous polymeric composite materials (PCM) in their structures has been revealed. The prospects of applying the effects of microwave radiation (microwave electromagnetic field) on the formation of the required properties of products from PCM and the feasibility of studying the mechanisms of interaction of microwave radiation with the structure of solidified PCM are shown. Experimental studies of the thermophysical interaction of PCM reinforced with carbon fibers with a microwave electromagnetic field with a frequency of 2450 MHz were performed. **Conclusion** The fact of more intensive heating of samples of greater thickness and their greater shielding capacity was established. In the study of the thermophysical parameters of PCM subjected to preliminary processing in the microwave electromagnetic field by the modified Parker method, an increase in certain exposure modes of the thermal and thermal conductivities by 20% was observed, which indicates an increase in adhesive bonds in the interfacial zones and an increase in the structure density. This fact can be used in the development of technologies for modifying products from PCM, designed to work in conditions of elevated temperature gradients, which will reduce the magnitude of thermal stresses.

Acknowledgment The research was supported by RFBR grant No. 17-03-00720 «Methodology of optimising microconstruction of composite materials for complex shape objects with increased dynamic strength, formed layer-by-layer by electrotechnological methods».

Keywords: polymer composite materials, physicomechanical properties, microwave radiation, temperature, thermal diffusivity, thermal conductivity, heating kinetics, heating uniformity, quasi-structured, hardened state

Введение. Анализ научно-технической литературы, материалов конференций и выставок свидетельствует об интенсивном развитии производства композиционных материалов на основе углеродных волокон и стеклотканей и их широком применении в авиационной, автомобильной, судостроительной промышленности, ракетостроении и космической технике. По данным исследовательской компании Grand View Research, объем мирового рынка углепластиков достигнет к 2022 году 23,55 млрд. долл. Потребление углеволокна может вырасти с 68 тыс. т. в настоящее время до 130 тыс. т. в 2020 году [1,2].

В настоящее время по объему потребления углеродсодержащих композитов на первом месте стабильно находится энергетика и, в частности – ветроэнергетика (23 %), далее следует аэрокосмическая и оборонная промышленность (18 %), затем – производство товаров для спорта и досуга (17 %). Однако, в стоимостном выражении основной объем потребления приходится на аэрокосмические отрасли и составляет более 40 %, что связано с повышенными требованиями к качеству и, соответственно, большими затратами на высокотехнологичное производство [3,4].

Изложенное, свидетельствует о существовании и сохранении в близкой и отдаленной перспективе потребности высокотехнологичных производств в применении композиционных материалов высокого качества и эффективных технологий изготовления конструкций из них.

Совершенствование прочностных, деформационных, теплофизических характеристик углепластиков и повышение их теплостойкости дает возможность использовать их даже в высоконагруженных деталях типа крыльев, вертикальных рулей маневренной военной авиационной техники.

Разработаны научные основы получения полимерной матрицы непосредственно на наполнителе предварительно полученного полимера. Это дало возможность изготавливать крупногабаритные панели и силовые конструкции авиалайнеров МС-21 и «Сухой-Суперджет» [5] и истребителей пятого поколения [6]. Однако, важнейшим объективным свойством ПКМ, которое отрицательно влияет на их эксплуатационные характеристики, является анизотропия, что в частности определяется укладкой волокон.

Матрица, как правило, является изотропной. Если волокна или частицы расположены в матрице хаотически, то свойства композиционного материала изотропны в объеме материала, являющемся достаточно представительным.

В материалах, изготовленных из волокон наполнителя, нити расположены под прямыми углами друг к другу и свойства композиционного материала в направлении нитей отличаются от свойств в других направлениях.

Если в перекрестном направлении уложено одинаковое число нитей, то свойства материала в этих направлениях одинаковы и такой материал является равновесным.

В тех случаях, когда число нитей, расположенных в одном направлении, больше, чем в другом, свойства материала в направлении с большим числом волокон выше, чем свойства в другом направлении и такой материал относится к неравновесным.

Это справедливо также для армирования однонаправленными тканями.

Очевидно, что если используется комбинированная укладка различных слоев, таких как маты, равновесная и неравновесная ткань, результирующие свойства композита могут быть анизотропными. В частности, это справедливо для случая последовательной укладки под произвольными углами друг к другу слоев ткани или волокон.

Существуют трансверсально-изотропные композиционные материалы, имеющие последовательную укладку под произвольными углами друг к другу слоев ткани или волокон, в результате чего можно выделить плоскость изотропии.

В частности это справедливо для случая последовательной укладки под произвольными углами друг к другу слоев ткани или волокон. Такой однонаправленно армированный материал представляет собой сплошное макроскопически однородное моноотропное (трансверсальное) тело.

Таким образом, возможность ориентировать отдельные слои и волокна при изготовлении конструкций позволяет по мере необходимости варьировать упругие и прочностные свойства в различных направлениях, полностью используя прочность материала наполнителя. Механическое поведение композиции определяется соотношением свойств армирующих элементов и матрицы, а также прочностью связи между ними. Эффективность и работоспособность материала зависят от правильного выбора исходных компонентов и технологии их совмещения, призванной обеспечить прочную связь между компонентами при сохранении их первоначальных характеристик [7].

Влияние анизотропии учитывают различными методами. Композиты упрочняются короткими частицами игольчатой формы, ориентированными в пространстве случайным образом. При этом композитный материал получается анизотропным в микрообъемах, но изотропным в объемах всего изделия.

Однако при этом существуют многочисленные сшивки коротких волокон, могущие стать зародышами трещинообразования и разрушения при динамических нагрузках. Поэтому с целью получения высоких механических характеристик композиционные материалы в нагруженных конструкциях проектируют заданно анизотропными. В результате такие материалы обладают

повышенными прочностными характеристиками в направлении армирующих волокон, но мало прочны при нагружении поперек волокон [8,9].

В целом можно заключить, что известные конструктивные методы повышения прочности конструкционных элементов на макроуровне основаны на увеличении размеров и, следовательно, массы данного элемента. Более перспективными можно считать решения, не приводящие к изменению размеров и массы изделия, например, переконструирование структуры композиционного материала в соответствии с действующей схемой нагрузок. Но проблема оптимизации топологии рассматривается как одна из наиболее сложных задач из-за проблемы сингулярности и сильной нелинейности системы ограничений [10-12].

Таким образом, изыскание альтернативных способов повышения эксплуатационных характеристик изделий из ПКМ представляет собой важную для науки и практики задачу.

Постановка задачи. Одной из важных задач, связанных с использованием композиционных материалов, является обеспечение заданных свойств материала.

Существуют различные подходы к решению указанной проблемы, в частности много внимания уделяется соблюдению технологических процессов при производстве материалов, изучению свойств наполнителя и связующего, используются расчетные методы, исходными данными для применения которых является безусловное знание параметров состава, структуры, схемы армирования композита.

Однако лишь некоторые из них, например, объемное соотношение компонентов, геометрические характеристики армирующих элементов, характер анизотропии свойств и некоторые другие можно считать задаваемыми с достаточной степенью точности. При этом другие параметры, напротив, являются весьма переменными под действием как технологических, так и эксплуатационных факторов воздействия. К ним относятся практически все характеристики свойств компонентов и межфазного слоя.

Широко известны факты колебаний механических характеристик композиционных материалов, в частности, в 1,5-2 и более раз при формировании заготовок изделий различными способами, например, «мокрой» и «сухой» намоткой, при переработке этих заготовок в готовые изделия различными методами формования, например, вакуумным, автоклавным и прессовым, а также в результате различной подготовки выбранных волокон к переработке в составе композита и отклонений от оптимальных режимов переработки материала.

Указанные технологические отклонения можно устранить отработкой технологического процесса, организацией контроля качества объекта производства на каждом рабочем месте, используя при этом экспериментальные исследования влияния различных факторов на свойства композиционного материала – метода давления формования, остаточных напряжений, угловой погрешности при укладке волокон.

Наиболее сложно учитывать объективные изменения свойств материалов – при переходе от стандартных образцов для испытания свойств к реальным машиностроительным изделиям неизбежно возникает проблема «масштабного фактора», т.е. отклонение от ожидаемых характеристик композита в связи с изменением его размеров [13].

Для локального управляющего воздействия на структуру и прочностные свойства трехмерного или двумерного объекта из неметаллических материалов в качестве наиболее эффективных методов представляются применение микроволнового излучения (СВЧ электромагнитного поля).

Проведенный анализ материалов отечественных и зарубежных научных публикаций [14-17] показывает, что наибольшее внимание в развитии исследований в области сверхвысокочастотной обработки материалов уделяется поиску принципиально новых решений для применения микроволновых технологий с целью замещения существующих технологий термообработки различных диэлектрических материалов.

В настоящее время создана теория СВЧ нагрева диэлектрических материалов и разработаны научные основы расчета СВЧ камер различного типа. При этом практически отсутствует информация о механизме воздействия СВЧ электромагнитного поля на отвержденную структуру окончательно сформированного изделия.

Ранее нами выполнены исследования влияния СВЧ электромагнитного поля на прочностные характеристики и микроструктуру изделий из пултрузионного карбона [18,19]. Однако, полученных данных недостаточно для выявления физического механизма взаимодействия СВЧ электромагнитного поля с отвержденными ПКМ, армированными углеродными волокнами.

Целью исследований является изучение влияния СВЧ электромагнитного поля на теплофизические характеристики ПКМ, армированных углеродными волокнами, как одного из факторов, свидетельствующих об определенном переструктурировании материала, приводящем к изменению его эксплуатационных свойств.

Методы исследования. В настоящее время механизм воздействия СВЧ электромагнитного поля на полимерные и композиционные материалы описывается следующим образом [12,14,15,20,21]. СВЧ излучение по длине волны, находится между световым излучением и радиоволнами, поэтому и обладает свойствами и света, и радиоволн. Оно, как и свет, может распространяться по прямой и перекрываться твердыми объектами. Как и свет, оно может фокусироваться и распространяться в виде луча.

Стандартной частотой для микроволновых печей и промышленных СВЧ установок является частота 2450 МГц. Это частота резонансного поглощения для молекул воды. Под влиянием физических колебательных воздействий, как и при нагревании, повышается подвижность структурных элементов полимера, то есть по существу такие воздействия эквивалентны повышению температуры. Наибольшего эффекта от применения колебательных воздействий следует ожидать при совпадении частоты внешнего воздействия с частотой собственных колебаний структурных элементов макроцепей [21].

При использовании микроволнового излучения на стадии отверждения на свойства изделия оказывает влияние эффект технологической наследственности предшествующих операций. Для реализации технологии требуется создание совершенно нового технологического оборудования для синтеза и формирования полимера и композита, что сопряжено с изменением существующих нормативных технологий.

Следовательно, целесообразным является применение модифицирующего упрочняющего воздействия, не приводящего к чрезмерному деструктурирующему разогреву материалов. Таким воздействием может явиться обработка в СВЧ электромагнитном поле малой удельной мощности, осуществляемая после завершения всех формообразующих операций, как финишный процесс. С другой стороны, выполненный анализ позволяет предположить, что колебательные процессы в микроструктуре ПКМ могут привести к ее перестройке, изменению количества и характера связей в системе «матрица-волокно» и, как следствие – привести к изменению движения тепловых потоков в материале при его нагреве в процессе эксплуатации.

Обсуждение результатов. В качестве образцов использовали композиционный материал КМКУ-1.80.Э0,1, состоящий из матрицы на основе клеевого связующего ВК-51 и наполнителя - углеродной ленты ЭЛУР-П-А. Объемная доля наполнителя составляла 70 %. Экспериментальные исследования проводили по следующей методике.

На первом этапе исследовали степень нагрева образцов из ПКМ различной толщины в СВЧ электромагнитном поле. В процессе исследований образец закрепляли на боковой поверхности емкости из фторопласта Ф4, в которую помещали 100 мл водопроводной воды при температуре +18 °С. На образец воздействовали СВЧ электромагнитным полем частотой 2450 МГц с расстояния 65 мм в течение 10 мин.

Осуществляли непрерывную запись изменения температуры образца и воды в емкости при помощи тепловизора модели FLIR E40 (США). В эксперименте использовали микроволновую установку «Жук-2-02» с излучающей рупорной антенной (ООО «АгроЭкоТех» г. Обнинск Калужской обл.), с выходной мощностью 1200 Вт. Конкретные режимы СВЧ воздействия не приводятся в связи с проходящим патентованием. Для определения теплофизических характеристик образцов применяли метод Паркера в варианте, описанном в [22, 23].

Для нагрева образцов использовали специально разработанную установку с источником в виде прожектора FL(ИО) 1000 IP54 ИЭК LPI01-1-1000-K01 (Россия).

Предварительно образцы подвергали воздействию СВЧ электромагнитного поля в течение 2 мин. На основе полученных данных по зависимостям [23] рассчитывали коэффициенты температуро- и теплопроводности. Для изучения кинетики нагрева с термограммы каждые 10с фиксировали значения температуры образца в среднем сечении и на его периферии.

Установлено, что в начальный момент времени (порядка 30 с) экран из ПКМ меньшей толщины разогревается более интенсивно. При этом начальная температура воды практически не изменяется в течение 3 минут, в то время как температура экранов возрастает практически в 2 раза. С увеличением времени воздействия СВЧ электромагнитного поля экран большей толщины разогревается более интенсивно, а более тонкий экран – в меньшей степени.

По-видимому, различие в интенсивности роста температуры рассматриваемых образцов заключается в большем объеме диэлектрической матрицы в экране большей толщины, которая вносит основной вклад в рост температуры. Спустя 10 мин различие в температуре экрана и воды практически двухкратное (80°C и 40°C соответственно).

Данный факт необходимо учитывать при проектировании технологий СВЧ модифицирования отвержденных ПКМ с различным сечением, чтобы предотвратить перегрев и деструктурирование материала.

Влияние микроволнового излучения на кинетику нагрева ПКМ иллюстрируется графиками на рис. 1.

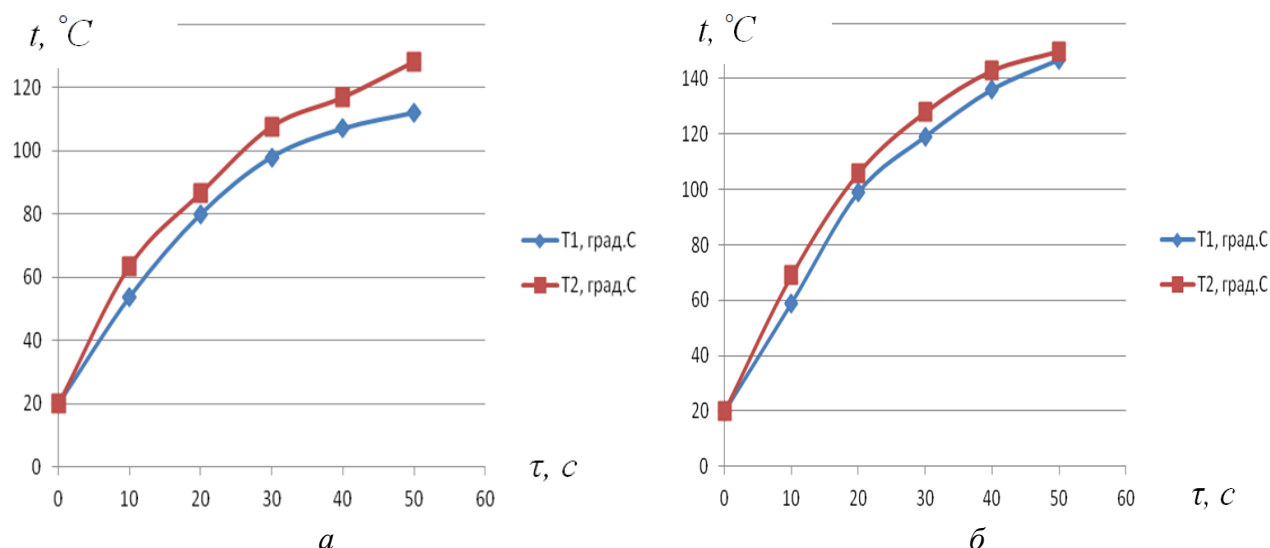


Рис. 1. Кинетика нагрева контрольного (а) и обработанного при малой (б) подведенной СВЧ мощности образцов. T₁ и T₂ соответственно температура периферийной и средней зоны образца

Fig. 1. Kinetics of heating the control (a) and processed at low (b) summed microwave power of the samples. T₁ and T₂, respectively, the temperature of the peripheral and middle zones of the sample

Воздействие СВЧ электромагнитного поля различной подведенной мощности по-разному влияет на теплофизические свойства ПКМ. Образец, обработанный при большой СВЧ мощности, за одно и то же время нагревается примерно до той же температуры, что контрольный образец. При этом его температуро- и теплопроводность снижены на (23-25) %.

Образец, подвергнутый СВЧ воздействию меньшей мощности, нагревается более интенсивно (увеличение более 15 %).

При этом его температуро- и теплопроводность выше, чем у контрольного образца на (19-20) %. Также следует отметить сближение температур периферийной и центральной зон образца к окончанию процесса нагрева. Объяснить полученные результаты можно, используя приведенные выше гипотезы о механизме влияния СВЧ электромагнитного поля на диэлектрические компоненты ПКМ.

При малых уровнях СВЧ мощности, не приводящих к нагреву материала более 40°C, происходит перестройка физических и химических связей в межфазной зоне, увеличение площади

контактных поверхностей матрицы и армирующих волокон, возможно залечивание микропор и микротрещин. Можно говорить о «квазиструктурировании» обработанного материала.

В результате тепловой поток от нагревателя рассеивается в меньшей степени и распространяется по объему объекта более равномерно, обеспечивая интенсивное прогревание.

При воздействии значительных уровней СВЧ мощности возможны интенсивные колебания диполей матрицы и мгновенное выделение тепла, приводящее к возникновению внутренних напряжений, при релаксации вызывающих растрескивание материала и образование микропустот, создающих барьер на пути тепловых потоков. В результате равномерность и интенсивность нагрева такого образца снижаются.

Вывод. Проведенные исследования влияния воздействия СВЧ электромагнитного поля на теплофизические характеристики полимерных композиционных материалов, армированных углеродными волокнами, выявили изменение их температуро- и теплопроводности.

Установлено при воздействии СВЧ электромагнитного поля малой мощности повышение температуро- и теплопроводности на 20 %, что может явиться одним из методов повышения устойчивости изделий из ПКМ при эксплуатации в условиях высоких градиентов температур, например в космических аппаратах и высокоскоростных авиационных системах.

Показано, что изделия из ПКМ, обладающие большей площадью поперечного сечения и, в частности, толщиной, нагреваются в СВЧ электромагнитном поле более интенсивно, что необходимо учитывать при разработке технологий модифицирования отвержденных ПКМ с целью предотвращения их термической деструкции.

Библиографический список:

1. Мирный, М. Мировой рынок углепластиков достигнет отметки в \$23 млрд к 2022 году [Электронный ресурс] / М. Мирный // Режим доступа: URL: <https://mplast.by/novosti/2016-04-29-mirovoy-rynok-ugleplastikov-dostignet-otmetki-v-23-mlrd-k-2022-godu/>. (28.11.2018 г.)
2. Каблов, Е. Н. Материалы и химические технологии для авиационной техники / Е. Н. Каблов // Вестник Российской академии наук. – 2012. – Т. 82. – № 6. – С. 520-530.
3. Комков, М. А. Технология намотки композиционных конструкций ракет и средств поражения [Текст]: учеб. пособие / М. А. Комков, В. А. Тарасов. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. – 431 с.
4. Ahmad A. A. Optimal Design of Tow-Placed Pressurized Fuselage Panels for Maximum Failure Load with Buckling Considerations [Текст] / A. A. Ahmad, M. M. Abdalla, and Z. Gurdal // Journal of Aircraft. – 2010. – Vol. 47. – № 3. – P. 775-782.
5. Садовская, Т. Г. Проблемы и перспективы реализации политики импортозамещения при формировании производственной кооперации по применению композиционных материалов в отечественном гражданском авиастроении на примере ОАО «Объединенная авиастроительная корпорация» / Т. Г. Садовская, Е. А. Лукина [Электронный ресурс] // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2014. – Вып. 11. – С. 1-12. – Режим доступа: URL: <http://engjournal.ru/catalog/indust/hidden/1221.html>. (30.11.2018)
6. Гуняев, Г. М. Полимерные композиционные материалы в конструкциях летательных аппаратов [Электронный ресурс] / Г. М. Гуняев, В. В. Кривонос, А. Ф. Румянцев и др. // Конверсия и машиностроение. – 2004. – № 4. – Режим доступа: URL: <https://viam.ru/public/files/2003/2003-203958.pdf>. (30.11.2018)
7. Брытков Е.В. Механика композиционных материалов: учебное пособие / Е.В. Быков, В.А. Санников; Балт. гос. техн. ун-т. – СПб., 2012. 74 с.
8. Гусева, Р. И. Производство изделий из ПКМ в самолетостроении [Текст]: учеб. пособие / Р.И. Гусева. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВПО «КНАГТУ», 2013. – 135 с.
9. Комарова, Т. В. Получение углеродных материалов [Текст]: учеб. пособие / М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2001. – 95 с.
10. Luo, Y. An enhanced aggregation method for topology optimization with local stress constraints [Текст] / Y. Luo, M. Y. Wang, Z. Kang // Comput Method Appl. – 2013. – М. – 254:31-41.
11. Akash D. Topology Optimization of Bridge Structures Using Optimality Criteria Method [Текст] / D. Akash, M. Anadi // International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRAS ET). – May 2015. – V. 3. – no 5. – P. 1034-1038.
12. Павлов, С. П. Оптимизация формы термоупругих тел [Текст]: монография / С. П. Павлов, В. А. Крысько. – Саратов: Изд-во СГТУ, 2000. – 160 с.
13. Кербер М.Л. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология: учеб. пособие / М.Л. Кербер, В.М. Виноградов, Г.С. Головкин и др.; под ред. А.А. Берлина. – СПб.: Профессия, 2008. – 560 с.

14. Архангельский, Ю. С. Справочная книга по СВЧ-электротермии: справочник [Текст] / Ю. С. Архангельский. – Саратов: Научная книга, 2011. – 560 с.
15. Estel, L. Microwave assisted blow molding of polyethylene-terephthalate (PET) bottles [Текст] / L. Estel, Ph. Leb-
audy, A. Ledoux, C. Bonnet, M. Delmotte // Proceedings of the Fourth World Congress on Microwave and Radio Frequency
Applications. – 2004. – no 11. – P. 33-35.
16. Коломейцев, В. А. Экспериментальные исследования уровня неравномерности нагрева диэлектрических
материалов и поглощенной мощности в СВЧ устройствах резонаторного типа [Текст] / В. А. Коломейцев, Ю. А.
Кузьмин, Д. Н. Никуйко, А. Э. Семенов // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2013. – Т. 18. – № 12.
– С. 25-31.
17. Коломейцев, В. А. Микроволновые системы с равномерным объемным нагревом. Ч.1. [Текст] / В. А.
Коломейцев, В. В. Комаров. – Саратов: Изд-во СГТУ, 1997. – 251 с.
18. Zlobina, I. V. The influence of electromagnetic field microwave on physical and mechanical characteristics of
CFRP (carbon fiber reinforced polymer) structural [Текст] / I. V. Zlobina, N. V. Bekrenev // Solid State Phenomena. – 2016.
– V. 870. – P. 101-106.
19. Злобина, И. В. Исследование микроструктуры конструкционных слоистых углепластиков, модифициро-
ванных путем электрофизических воздействий [Текст] / И. В. Злобина, Н. В. Бекренев // Вестник РГАТУ, 2017. – №
1(40). – С. 236-242.
20. Комаров, В. В. Формулировки математических моделей процессов взаимодействия электромагнитных
волн с диссипативными средами в СВЧ-нагревательных системах [Текст] / В. В. Комаров // Физика волновых про-
цессов и радиотехнические системы. – 2010. – Т. 13. – № 4. – С. 57-63.
21. Studentov, V. N. Effect of vibration in Processes of structure Formation in Polymers [Текст] / V. N. Studentov, I.
V. Pyataev // Russian Journal of Applied Chemistry. – 2014. – Vol. 87. – № 3. – P. 352-354.
22. Вавилов, В. П. Определение теплофизических характеристик материалов методом термографии [Текст]
/ В. П. Вавилов, В. Г. Торгунаков, Д. А. Нестерук и др. // Известия Томского политехнического университета. – 2006.
– Т. 309. – № 2. – С. 130-134.
23. Фалилеев А.Д. Практическая реализация метода Паркера для определения температуропроводности
[Текст] // Современная техника и технологии: сб. XVIII междунар. научно-практ. конф. В 3 т. – Т. 3. – Томск. – 2012.
– С. 137-138.

References:

1. Mirnyy, M. Mirovoy rynek ugleplastikov dostignet otmetki v \$23 mlrd k 2022 godu [Elektronnyy resurs] /
M. Mirnyy // Rezhim dostupa: URL: <https://mplast.by/novosti/2016-04-29-mirovoy-rynok-ugleplastikov-dostignet-otmetki-v-23-mlrd-k-2022-godu/>. (28.11.2018 g.) [Mirnyy, M. The global carbon-fiber market will reach \$ 23 billion by 2022 [Electronic resource] / M. Mirnyy // Access mode: URL: <https://mplast.by/novosti/2016-04-29-mirovoy-rynok-ugleplastikov-dostignet-otmetki-v-23-mlrd-k-2022-godu/>. (11/28/2018) (In Russ.)]
2. Kablov, Ye. N. Materialy i khimicheskiye tekhnologii dlya aviatsionnoy tekhniki / Ye. N. Kablov // Vestnik
Rossiyskoy akademii nauk. – 2012. – Т. 82. – № 6. – С. 520-530. [Kablov, E.N. Materials and chemical technologies for
aviation technology / E.N. Kablov // Bulletin of the Russian Academy of Sciences. - 2012. - Т. 82. - № 6. - p. 520-530. (In
Russ.)]
3. Komkov, M. A. Tekhnologiya namotki kompozitsionnykh konstruktsiy raket i sredstv porazheniya [Tekst]:
ucheb. posobiye / M. A. Komkov, V. A. Tarasov. – М.: MGTU im. N.E. Bauman, 2011. – 431 s. [Komkov, M.A. Technology
of winding composite structures of missiles and weapons of destruction [Text]: studies. manual / M. A. Komkov, V. A.
Tarasov. - М.: MSTU. N.E. Bauman, 2011. - 431 p. (In Russ.)]
4. Ahmad A. A. Optimal Design of Tow-Placed Pressurized Fuselage for Maximum Failure Load with Bucking
Considerations [Text] / A. A. Ahmad, M. M. Abdalla, and Z. Gurdal // Journal of Aircraft. - 2010. - Vol. 47. - №. 3. - p. 775-
782.
5. Sadovskaya, T. G. Problemy i perspektivy realizatsii politiki importozameshcheniya pri formirovaniy proizvod-
stvennoy kooperatsii po primeneniyu kompozitsionnykh materialov v otechestvennom grazhdanskom aviastroenii na pri-
mere OAO «Ob'yedinennaya aviastroitel'naya korporatsiya» / T. G. Sadovskaya, Ye. A. Lukina [Elektronnyy resurs] // In-
zhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii. – 2014. – Vyp. 11. – S. 1-12. – Rezhim dostupa: URL: [http://engjournal.ru/cata-
log/indust/hidden/1221.html](http://engjournal.ru/catalog/indust/hidden/1221.html). (30.11.2018) [Sadovskaya, T. G. Problems and prospects for the implementation of the policy
of import substitution in the formation of industrial cooperation on the use of composite materials in the domestic civil
aircraft industry as an example of United Aircraft Building Corporation / T. G. Sadovskaya, E. A. Lukina [Electronic re-
source] // Engineering Journal: Science and Innovation. - 2014. - Vol. 11. - p. 1-12. - Access mode: URL: [http://engjour-
nal.ru/catalog/indust/hidden/1221.html](http://engjournal.ru/catalog/indust/hidden/1221.html). (11/30/2018) (In Russ.)]
6. Gunayev, G. M. Polimernyye kompozitsionnyye materialy v konstruktsiyakh letatel'nykh apparatov [El-
ektronnyy resurs] / G. M. Gunayev, V. V. Krivonos, A. F. Rumyantsev i dr. // Konversiya i mashinostro-yeniye. – 2004.–
№ 4. – Rezhim dostupa: URL: <https://viam.ru/public/files/2003/2003-203958.pdf>. (30.11.2018) [Gunayev, G. M. Polymer
composite materials in the construction of aircraft [Electronic resource] / G. M. Gunayev, V. V. Krivonos, A. F. Rumyantsev,
etc. // Conversion and machine-building. - 2004.– № 4. - Access mode: URL: [https://viam.ru/public/files/2003/2003-
203958.pdf](https://viam.ru/public/files/2003/2003-203958.pdf). (11/30/2018) (In Russ.)]

7. Brytkov Ye.V. Mekhanika kompozitsionnykh materialov: uchebnoye posobiye / Ye.V. Bykov, V.A. Sannikov; Balt. gos. tekhn. un-t. – SPb., 2012. 74 s. [Brytkov E.V. Mechanics of composite materials: study guide / E.V. Bykov, V.A. Sannikov; Balt state tech. un-t – SPb., 2012. 74 p. (In Russ.)]
8. Guseva, R. I. Proizvodstvo izdeliy iz PKM v samoletostroyenii [Tekst]: ucheb. posobiye / R.I. Guseva. – Komsomol'sk-na-Amure: FGBOU VPO «KNAGTU», 2013. – 135 s. [Guseva, R. I. Production of PCM products in aircraft manufacturing [Text]: studies. manual / R.I. Gusev. – Komsomolsk-on-Amur: KNAGTU FGBOU VPO, 2013. – 135 p. (In Russ.)]
9. Komarova, T. V. Polucheniye uglerodnykh materialov [Tekst]: ucheb. posobiye / M.: RKHTU im. D.I Mendeleeva, 2001. – 95 s. [Komarova, T. V. Obtaining carbon materials [Text]: studies. manual / M.: RHTU them. D.I. Mendeleev, 2001. – 95 p. (In Russ.)]
10. Luo, Y. An improved aggregation method with local stress constraints [Text] / Y. Luo, M. Y. Wang, Z. Kang // Comput Method Appl. – 2013. – M. – 254: 31-41.
11. Akash D. Topology Optimization of Bridge Structures Using the Optimality Criteria Method [Text] / D. Akash, M. Anadi // International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRAS ET). – May 2015. – V. 3. – no 5. – p. 1034-1038.
12. Pavlov, S. P. Optimizatsiya formy termouprugikh tel [Tekst]: monografiya / S. P. Pavlov, V. A. Krys'ko. – Saratov: Izd-vo SGTU, 2000. – 160 s. [Pavlov, S. P. Optimization of the shape of thermoelastic bodies [Text]: monograph / S. P. Pavlov, V. A. Krys'ko. – Saratov: Publishing house SSTU, 2000. – 160 p. (In Russ.)]
13. Kerber M.L. Polimernyye kompozitsionnyye materialy: struktura, svoystva, tekhnologiya: ucheb. posobiye / M.L. Kerber, V.M. Vinogradov, G.S. Golovkin i dr.; pod red. A.A. Berlina. – SPb.: Profes-siya, 2008. – 560 s. [Kerber M.L. Polymeric composite materials: structure, properties, technology: studies. manual / M.L. Kerber, V.M. Vinogradov, G.S. Golovkin et al.; by ed. A.A. Berlin – SPb.: Profession, 2008. – 560 p. (In Russ.)]
14. Arkhangel'skiy, YU. S. Spravochnaya kniga po SVCH-elektrotermii: spravochnik [Tekst] / YU. S. Arkhangel'skiy. – Saratov: Nauchnaya kniga, 2011. – 560 s. [Arkhangel'skiy, Yu.S. Reference book on microwave electrothermia: a reference [Text] / Yu. S. Arkhangel'skiy. – Saratov: Scientific book, 2011. – 560 p. (In Russ.)]
15. Estel, L. Microwave assisted polyethylene-terephthalate (PET) bottles [Text] / L. Estel, Ph. Lebaudy, A. Ledoux, C. Bonnet, M. Delmotte // Proceedings of the Fourth World Congress. – 2004. – no 11. – R. 33-35.
16. Kolomeytsev, V. A. Eksperimental'nyye issledovaniya urovnya neravnomernosti nagreva dielektricheskikh materialov i pogloshchennoy moshchnosti v SVCH ustroystvakh rezonatornogo tipa [Tekst] / V. A. Kolomeytsev, YU. A. Kuz'min, D. N. Nikuyko, A. E. Semenov // Elektromagnitnyye volny i elektronnyye si-stemy. – 2013. – T. 18. – № 12. – S. 25-31. [Kolomeytsev, V. A. Experimental studies of the level of irregularity of heating of dielectric materials and the absorbed power in microwave devices of a resonator type [Text] / V. A. Kolomeytsev, Yu. A. Kuzmin, D. N. Nikuyko, A. E. Semenov // Electromagnetic waves and electronic systems. – 2013. – T. 18. – № 12. – P. 25-31. (In Russ.)]
17. Kolomeytsev, V. A. Mikrovolnovyye sistemy s ravnomernym ob'yemnym nagrevom. CH.1. [Tekst] / V. A. Kolomeytsev, V. V. Komarov. – Saratov: Izd-vo SGTU, 1997. – 251 s. [Kolomeytsev, V. A. Microwave systems with uniform volumetric heating. Part 1. [Text] / V. A. Kolomeytsev, V. V. Komarov. – Saratov: Publishing house SSTU, 1997. – 251 p. (In Russ.)]
18. Zlobina, I.V. Carbon fiber-reinforced polymer (CFRP) / I.V. Zlobina, N.V. Bekrenev // The Solid State Phenomena. – 2016. – V. 870. – P. 101-106.
19. Zlobina, I. V. Issledovaniye mikrostruktury konstruksionnykh sloistnykh ugleplastikov, modifitsirovannykh putem elektrofizicheskikh vozdeystviy [Tekst] / I. V. Zlobina, N. V. Bekrenev // Vestnik RGATU, 2017. – № 1(40). – S. 236-242. [Zlobina, I. V. Study of the microstructure of structural laminated carbon-reinforced plastics modified by electrophysical influences [Text] / I. V. Zlobina, N. V. Bekrenev // Bulletin of the Russian State Logistics University, 2017. – № 1 (40). – p. 236-242. (In Russ.)]
20. Komarov, V. V. Formulirovki matematicheskikh modeley protsessov vzaimodeystviya elektro-magnitnykh voln s dissipativnymi sredami v SVCH- nagrevatel'nykh sistemakh [Tekst] / V. V. Komarov // Fi-zika volnovykh protsessov i radiotekhnicheskiye sistemy. – 2010. – T. 13. – № 4. – S. 57-63. [Komarov, V. V. Formulations of mathematical models of the processes of interaction of electromagnetic waves with dissipative media in microwave heating systems [Text] / V. V. Komarov // Physics of wave processes and radio engineering systems. – 2010. – V. 13. – № 4. – P. 57-63. (In Russ.)]
21. Studentsov, V.N. Effect of vibration in Processes of structure Formation in Polymers [Tekst] / V. N. Studentsov, I. V. Pyataev // Russian Journal of Applied Chemistry. – 2014. – Vol. 87. – № 3. – P. 352-354. Studentsov, V.N., and N.V. Studentsov, I.V. Pyataev // Russian Journal of Applied Chemistry. – 2014. – Vol. 87. – № 3. – P. 352-354.
22. Vavilov, V. P. Opredeleniye teplofizicheskikh kharakteristik materialov metodom termogra-fii [Tekst] / V. P. Vavilov, V. G. Torgunakov, D. A. Nesteruk i dr. // Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. – 2006. – T. 309. – № 2. – S. 130-134.
[Vavilov, V. P. Determination of thermophysical characteristics of materials by the method of thermography [Text] / V. P. Vavilov, V. G. Torgunakov, D. A. Nesteruk, etc. // Bulletin of Tomsk Polytechnic University. – 2006. – T. 309. – № 2. – P. 130-134. (In Russ.)]
23. Falileyev A.D. Prakticheskaya realizatsiya metoda Parkera dlya opredeleniya temperaturoprovodnosti [Tekst] // Sovremennyye tekhnika i tekhnologii: sb. XVIII mezhdunar. nauchno-prakt. konf. V 3 t. – T. 3. – Tomsk. – 2012. – S.

137-138.[Falileev A.D. Practical implementation of the Parker method for determining the thermal diffusivity [Text] // Modern technology and technology: Sat. XVIII Intern. Scientific and practical conf. In 3 t. - Т. 3. - Tomsk. - 2012. - p. 137-138. (In Russ.)]

Сведения об авторах.

Бекренев Николай Валерьевич – доктор технических наук, профессор, кафедра «Техническая механика и детали машин».

Злобина Ирина Владимировна – кандидат технических наук, доцент, кафедра «Техническая механика и детали машин»

Information about the authors.

Nikolaj V. Bekrenev – Dr. Sci. (Technical), Prof., Department of Technical mechanics and machine parts.

Irina V. Zlobina– Cand. Sci. (Technical), Assoc. Prof., Department of Technical mechanics and machine parts.

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 22.08.2018.

Принята в печать 25.09.2018.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 22.08.2018.

Accepted for publication 25.09.2018.

Для цитирования: Евдулов Д.В., Исмаилов Т.А., Казумов Р.Ш., Саркаров Т.Э. Натурные испытания опытного образца термоэлектрической системы, основанной на совместном использовании высокопоточных термоэлектрических батарей и цельнометаллических теплопроводов. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2018;45 (3):68-75. DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-3-68-75

For citation: Evdulov D.V., Ismailov T.A., Kazumov R.S., Sarkarov T.E. Natural tests of the experimental sample of the thermoelectric system, based on joint use of high-current thermoelectric batteries and all-metal thermal conductors 2018; 45 (3):68-75. (In Russ.) doi:10.21822/2073-6185-2018-45-3-68-75

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 681.382

DOI: 10.21822/2073-6185-2018-45-3-68-75

НАТУРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ОПЫТНОГО ОБРАЗЦА ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ, ОСНОВАННОЙ НА СОВМЕСТНОМ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СИЛЬНОТОЧНЫХ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ БАТАРЕЙ И ЦЕЛЬНОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТЕПЛОПРОВОДОВ

Евдулов Д.В.⁴, Исмаилов Т.А.¹, Казумов Р.Ш.³, Саркаров Т.Э.²

¹⁻⁴ Дагестанский государственный технический университет,

¹⁻⁴ 367026, г. Махачкала, пр. Имама Шамиля, 70, Россия,

¹e-mail:dstu@dstu.ru, ²e-mail: sarkarovta@mail.ru,

³e-mail:kazumov.rev@yandex.ru, ⁴e-mail: +79634051239@yandex.ru

Резюме. Целью статьи является разработка и исследование термоэлектрической системы, основанной на комбинированном использовании высокопоточных термоэлектрических батарей и теплопроводов, изготовленных из высокотеплопроводного материала (например, меди или алюминия), проведение натурных экспериментальных исследований опытного образца ТЭС. **Метод.** Представлена конструкция прибора экспериментального стенда опытного образца на основе комбинированного использования высокопоточных термоэлектрических батарей и теплопроводов, изготовленных из высокотеплопроводного материала. Разработана методика проведения натурных испытаний опытного образца на специально созданном лабораторном стенде с целью подтверждения адекватности полученных результатов ТЭС. **Результат.** Исследовано изменения температуры в различных точках ТЭС при фиксированном и различных токах питания, изменения температуры на конце теплопровода во времени при различных токах питания ТЭБ. Осуществлено сопоставление экспериментальных и расчетных данных опытного образца. **Вывод.** Результаты экспериментальных исследований показали эффективность разработанной термоэлектрической системы для осуществления дистанционного разделения источника холода и объекта охлаждения. Показано, что повысить эффективность термоэлектрической системы возможно при комбинированном использовании высокопоточных батарей и теплопроводов, изготовленных из высокотеплопроводного материала.

Ключевые слова: термоэлектрическая система, опытный образец, термоэлектрическая батарея, теплопровод, экспериментальный стенд, натурные испытания

TECHNICAL SCIENCE
POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL MECHANICAL ENGINEERING

NATURAL TESTS OF THE EXPERIMENTAL SAMPLE OF THE THERMOELECTRIC
SYSTEM, BASED ON JOINT USE OF HIGH-CURRENT
THERMOELECTRIC BATTERIES AND ALL-METAL THERMAL CONDUCTORS

Denis V. Evdulov⁴, Tagir A. Ismailov¹, Revshan Sh. Kazumov³, Tadjedin E. Sarkarov²

¹⁻⁴Daghestan State Technical University,

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

¹e-mail:dstu@dstu.ru,²e-mail: sarkarovta@mail.ru,

³e-mail:kazumov.rev@yandex.ru,⁴e-mail: +79634051239@yandex.ru

Abstract. Objectives The aim of the article is to develop and study a thermoelectric system based on the combined use of high-current thermoelectric batteries and heat pipelines made of high-heat-conducting material (e.g. copper or aluminum), to conduct full-scale experimental studies of the experimental sample of thermal power plants. **Method.** The design of the device of the experimental stand of the prototype on the basis of the combined use of high-current thermoelectric batteries and heat pipelines made of high-heat-conducting material is presented. The technique of full-scale tests of the prototype on a specially created laboratory bench to confirm the adequacy of the results of thermal power plants. **Result.** Temperature changes in different points of thermal power plants at fixed and different supply currents, temperature changes at the end of the heat pipeline in time at different supply currents of thermal power plants are investigated. The comparison of experimental and calculated data of the prototype is carried out. **Conclusion.** The results of experimental studies have shown the effectiveness of the developed thermoelectric system for remote separation of the cold source and the cooling object. It is shown that it is possible to increase the efficiency of thermal power plants with the combined use of high-current batteries and heat pipelines made of high-heat-conducting material.

Keywords: thermoelectric system, prototype, thermoelectric batteries, heat pipe, experimental stand, full-scale tests.

Введение. В настоящее время в практике проектирования радиоэлектронной аппаратуры очень часто возникает необходимость отделить источник холода от его потребителя (объекта охлаждения), являющихся составной частью блоков с плотной компоновкой элементов и расположенных в труднодоступных областях [1-4]. При использовании в качестве генератора холода термоэлектрического холодильника, последний, должен быть расположен на поверхности, либо в объеме, подлежащем охлаждению, в соответствии с чем, и система теплосъема термоэлектрической батареи (ТЭБ) должна быть расположена в непосредственной близости от объекта охлаждения [5-10]. Это обстоятельство в некоторой степени ограничивает использование термоэлектрического холодильника, когда вблизи потребителя холода из-за отсутствия места невозможно расположить систему теплосъема.

Постановка задачи. Для устранения указанного недостатка авторами предлагается термоэлектрическая система, основанная на совместном использовании высокоточных термоэлектрических батарей слоистого исполнения и теплопроводов изготовленных из высокотеплопроводного материала, например, меди или алюминия с минимальными потерями тепла по их длине [11-17].

Методы исследования. В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований ТЭС на основе комбинированного использования высокоточных ТЭБ слоистого исполнения и теплопроводов, изготовленных из высокотеплопроводного материала.

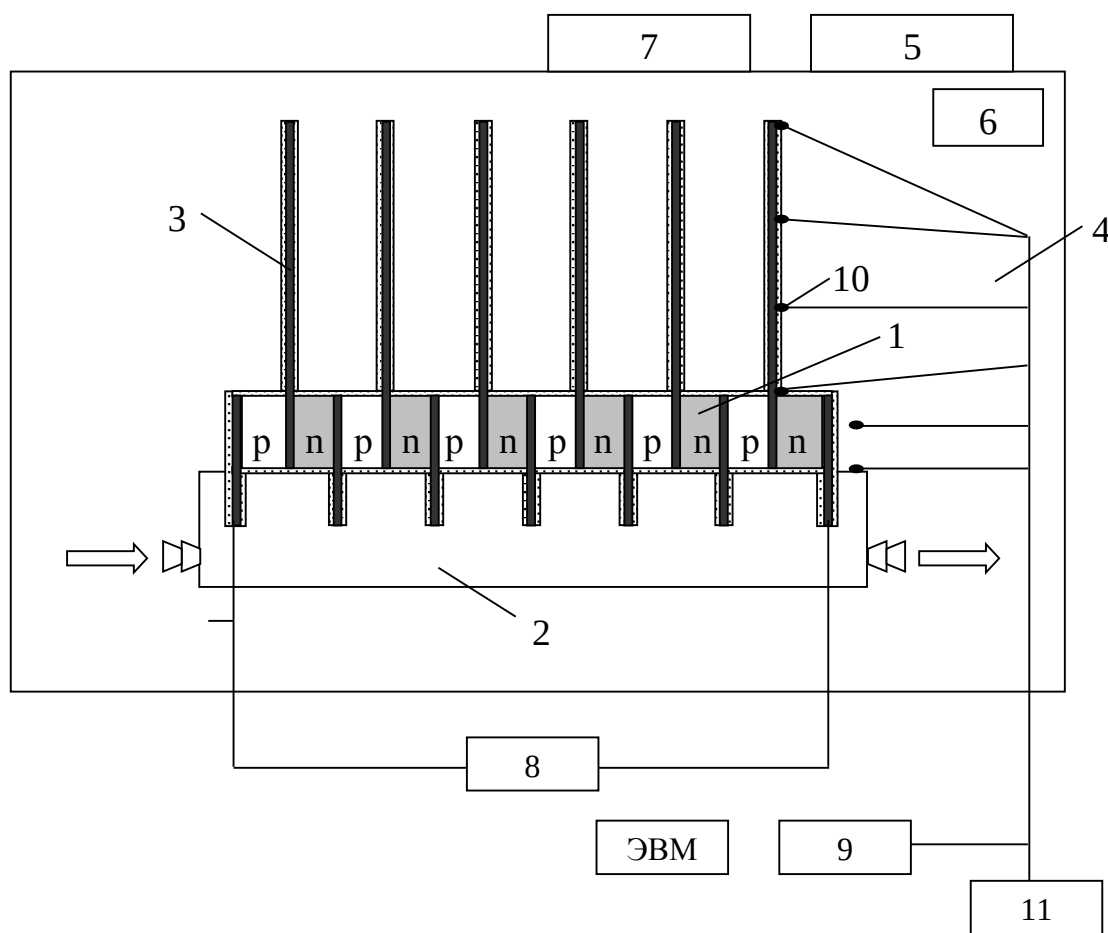


Рис.1 (а) Принципиальная схема экспериментального стенда
Fig.1. (a) Schematic diagram of the experimental stand



Рис.1. (б) Внешний вид экспериментального стенда
Fig.1. (b) Appearance of the experimental stand

Для проведения натурных испытаний термоэлектрической системы (ТЭС) был собран экспериментальный стенд, структурная схема которого приведена на рис.1, а, а внешний вид – на рис.1, б.

Объектом экспериментальных исследований являлся опытный образец ТЭС, в котором сопряжение тепловыделяющего элемента и ТЭБ осуществлялось за счет использования теплопроводов, изготовленных из высокотеплопроводного материала. ТЭС включает в себя слоистую ТЭБ 1, выполненную из 8 ТЭ, жидкостный теплообменный аппарат 2 для съема тепла с горячих

коммутационных пластин и теплопроводов 3, изготовленных из высокотеплопроводного материала, например, меди и алюминия.

Структура термоэлемента с геометрическими размерами и наложенной на нее конечно-элементной сеткой приведена на рис. 2 [18].

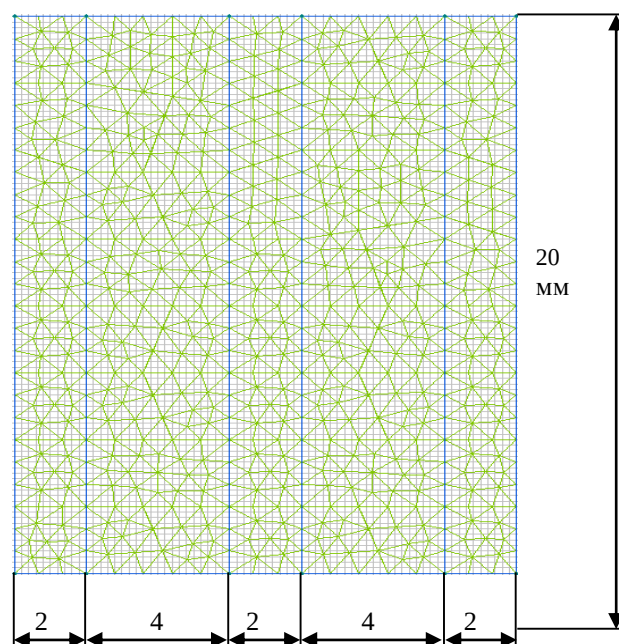


Рис. 2. Эскизный рисунок структуры термоэлемента с геометрическими размерами и, наложенной на нее, конечно-элементной сеткой

Fig. 2. A sketch drawing of a thermoelement structure with geometrical dimensions and a finite-element grid superimposed on it

При проведении экспериментальных исследований лабораторный опытный макет в процессе проведения эксперимента помещали в теплоизолированную климатическую камеру 4, термостатируемый объем которой составляет 120 литров.

Камера обеспечивает поддержание температуры в пределах от 283 до 343 К с точностью 1°C и относительной влажности в пределах 30 % - 98 %.

Заданная температура и относительная влажность в камере регулируются блоком управления 5, который связан с датчиком температуры и влажности 6, показания которого отображаются на цифровом табло 7. Питание ТЭБ осуществлялось высокоамперным регулируемым источником постоянного электрического тока 8 GW Laboratory DC PowerSupply GPR-1850HD.

Сбор экспериментальных данных осуществлялся автоматически с помощью измерителя технологического многоканального ИРТМ 2402/М3 9, который подключался к ПЭВМ и предусматривал возможность одновременного подсоединения до 24 датчиков температуры [19]. Измерения температуры в ходе эксперимента проводилось с помощью медь-константановых термопар 10, опорные спаи которых помещались в сосуд Дьюара 11, а сигнал снимался измерителем ИРТМ 2402/М3.

Напряжение и ток на ТЭБ фиксировались при помощи амперметра и вольтметра, встроенных в источник электрического тока.

В ходе эксперимента определялись напряжения и ток на ТЭБ, температура окружающей среды, температуры на холодных коммутационных пластинах, в различных точках теплопроводов, на входе и выходе жидкостного теплообменного аппарата.

На основе разработанного экспериментального стенда была проведена серия натурных испытаний опытного образца ТЭС, позволяющая судить об ее основных параметрах и характеристиках. Основной задачей при проведении экспериментальных исследований опытного образца являлось определение зависимости температуры в контрольных точках от времени при фиксированном токе и напряжении.

рованных значениях токов питания ТЭБ. Полученные экспериментальные исследования сравнивались с теоретическими с целью определения расхождений в значениях между экспериментальными и расчетными данными.

Обсуждение результатов. Технические требования, предъявляемые к прибору при его работе, в процессе эксперимента задавались следующими исходными данными [20]: изменение тока питания ТЭБ – от 10 до 50 А; температура окружающей среды – от 25 °С; точность поддержания температуры в камере 1 °С; охлаждение горячих коммутационных пластин ТЭБ осуществлялось жидкостным теплообменным аппаратом, где в качестве теплоносителя использовалась вода при ее температуре 23 °С и скорости течения 0,07 л/сек. На рис.3. приведены данные об изменении температуры в различных точках при токе питания ТЭБ, равном 35 А.

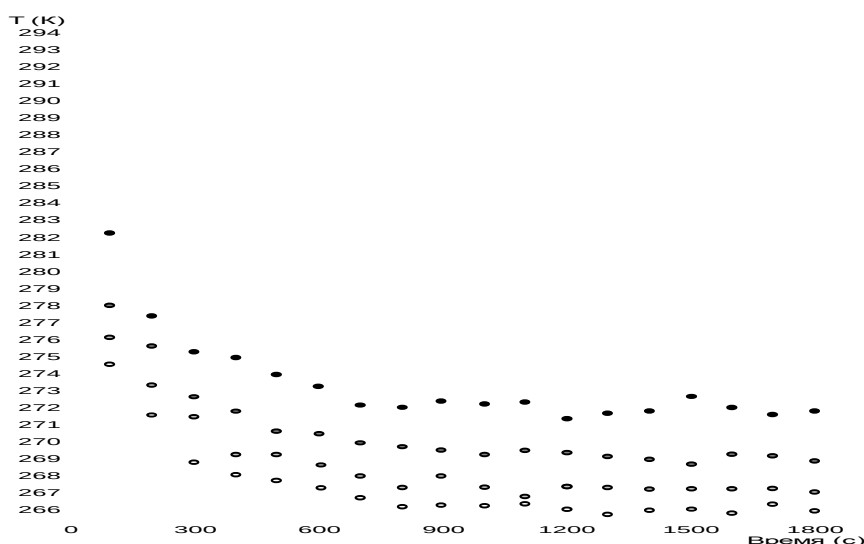


Рис. 3. Изменение во времени температуры в различных точках ТЭС при фиксированном токе питания ТЭБ: 1 – температура холодной коммутационной пластины, 2 – температура теплопровода на расстоянии 150 мм от холодной коммутационной пластины, 3 – температура теплопровода на расстоянии 300 мм от холодной коммутационной пластины, 4 – температура на конце теплопровода

Fig. 3. Temporal variation of temperature at various points of TPPs with a fixed supply of thermopile: 1 - temperature of the cold switching plate, 2 - temperature of the heat pipe at a distance of 150 mm from the cold switching plate, 3 - temperature of the heat pipe at a distance of 300 mm from cold switching plate, 4 - temperature at the end of the heat conductor

Как следует из представленных данных, перепад температур между холодным спаем ТЭБ и концом теплопровода длиной 0,425 м, выполненным из меди, составляет порядка 6 К. При этом данная величина перепада температур имеет примерно то же значение в диапазоне токов питания ТЭБ от 10 до 50 А, что следует из кривых, изображенных на рис.4-5, описывающих изменение температуры холодной коммутационной пластины и конца теплопровода во времени при различных величинах тока питания устройства.

Согласно приведенным данным для опытного образца ТЭС продолжительность выхода на стационарный режим работы составляет 20-25 мин. для различных точек системы. При этом продолжительность выхода на стационарный режим для контрольной точки, расположенной в конце теплопровода несколько выше, чем для холодной коммутационной пластины, и составляет около 25 мин., тогда как для последнего случая эта величина не превышает 20 мин. Данное обстоятельство объясняется удалением контрольной точки на конце теплопровода от источника холода – контакта ветви полупроводника и коммутационной пластины, конечным значением коэффициента теплопроводности материала теплопровода и теплопритоками из окружающей среды.

Максимальное снижение температуры получено при увеличении тока питания ТЭБ до 50 А. При этом температура коммутационной пластины снижалась до 258,5 К, контрольной точки в конце теплопровода – 264 К. Соответственно при последовательном уменьшении питающего

ТЭБ электрического тока до 40, 30, 20 и 10 А температура коммутационной пластины снижалась до 261,5, 267,5, 273 и 280 К, а на конце теплопровода – до 268,5, 273, 279, 285,5 К.

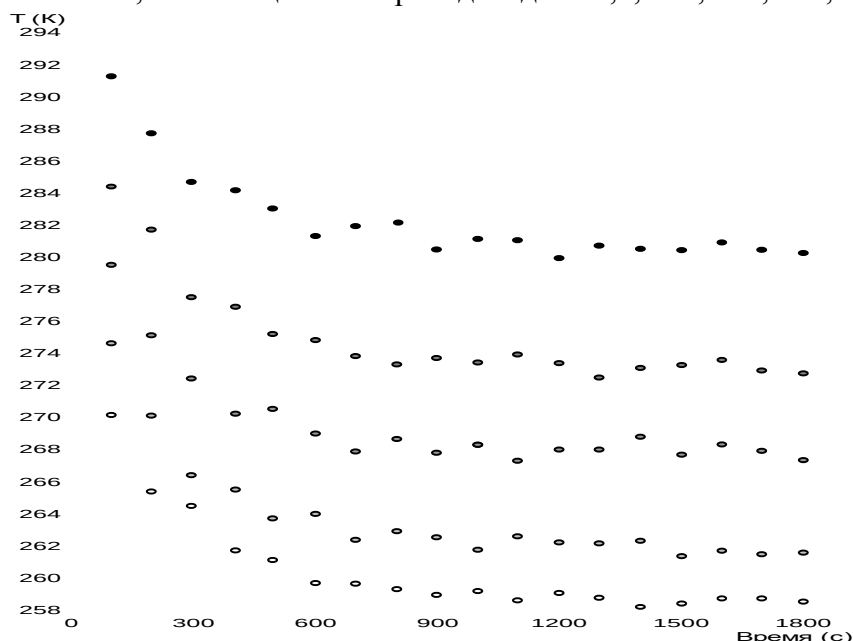


Рис. 4. Изменение температуры холодного спая во времени при различных токах питания ТЭБ: 1 – 50 А, 2 – 40 А, 3 – 30 А, 4 – 20 А, 5 – 10 А

Fig. 4. Temperature variation of the cold junction in time at different currents of the thermopile: 1 - 50 A, 2 - 40 A, 3 - 30 A, 4 - 20 A, 5 - 10 A

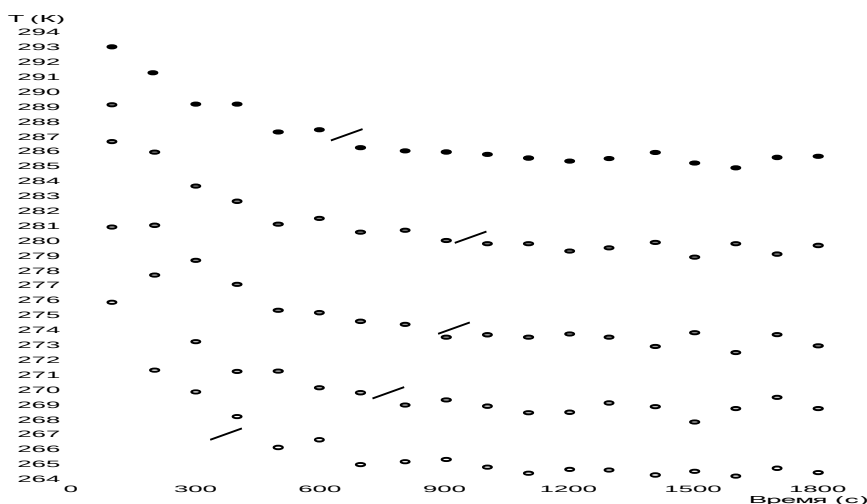


Рис. 5. Изменение температуры на конце теплопровода во времени при различных токах питания ТЭБ: 1 – 50 А, 2 – 40 А, 3 – 30 А, 4 – 20 А, 5 – 10 А

Fig. 5. Temperature change at the end of the heat conductor over time at different thermopile supply currents: 1 - 50 A, 2 - 40 A, 3 - 30 A, 4 - 20 A, 5 - 10 A

Вывод: В результате проведенных экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы: Результаты экспериментальных исследований показали эффективность разработанной термоэлектрической системы для осуществления дистанционного разделения источника холода и объекта охлаждения. Показано что повысить эффективность ТЭС возможно при совместном использовании сильточных батарей и теплопроводов изготовленных из высоко-теплопроводного материала.

Библиографический список:

1. Анатычук Л.И. Термоэлектричество. Термоэлектрические преобразователи энергии. - Киев, Черновцы: Институт термоэлектричества, 2003.
2. Анатычук Л.И. Элементная база термоэлектричества // Доклады IX Межгосударственного семинара "Термоэлектрики и их применение". - Санкт-Петербург, 2004.

3. Анатычук Л.И. О физических моделях термоэлементов // Термоэлектричество. - 2003, №1.
4. Булат Л.П. Прикладные исследования и разработки в области термоэлектрического охлаждения в России // Холодильная техника, 2009. - № 7.
5. Малкович Б.Е.-Ш. Термоэлектрические модули на основе сплавов теллурида висмута // Доклады XI Межгосударственного семинара "Термоэлектрики и их применение". - Санкт-Петербург, 2008.
6. Ssenoga Twaha, Jie Zhu, Yuying An, Bo Li A comprehensive review of thermoelectric technology: Materials, applications, modelling and performance improvement // Renewable and sustainable energy reviews, 2016. - №65.
7. Воронин А.И., Осилков А.С., Горбатовская Т.А. К вопросу о механической прочности ветвей термоэлементов на основе Bi_2Te_3 // Доклады XI Межгосударственного семинара "Термоэлектрики и их применение". - Санкт-Петербург, 2008.
8. Korzhuev M. A., Avilov E. S., Nichezina I. Yu. Non-standard Harman response at the separate measurement of stages of multicascade thermoelectric modules // JEMS. - 2011. - v. 40, №5.
9. Yagov V.V. Possible mechanisms of high-intensity heat transfer in cooling of high temperature surfaces // Materials IX International seminar «Heat pipes, heat pumps, refrigeration, power sources». - Minsk. - 2015.
10. Сулин А.Б., Богомолов И.Н. Компрессионно-термоэлектрические термостаты лабораторного назначения // Известия вузов. Приборостроение. - 2008. - №7.
11. Патент РФ № 2380787. Термоэлектрическая батарея / Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Евдулов Д.В., 2010.
12. Патент РФ № 2379790. Термоэлектрическая батарея / Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Евдулов Д.В., 2010.
13. Патент РФ № 2417484. Термоэлектрическая батарея / Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Евдулов Д.В., 2011.
14. Патент РФ № 2338299. Термоэлектрическая батарея / Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Вердиев М.Г., 2007.
15. Патент РФ № 2338298. Термоэлектрическая батарея / Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Вердиев М.Г., 2007.
16. Патент РФ № 2314663. Устройство для охлаждения элементов радиоэлектронной аппаратуры, работающих в режиме повторно-кратковременных тепловыделений / Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Вердиев М.Г., Менафов А.М., 2005.
17. Патент РФ № 2180161. Устройство для термостабилизации элементов радиоэлектронной аппаратуры с высокими тепловыделениями / Евдулов О.В., Исмаилов Т.А., Юсуфов Ш.А., Аминов Г.И., 2000.
18. Евдулов О.В., Евдулов Д.В. Теоретические исследования термоэлектрического элемента слоистой конструкции // Термоэлектричество. - 2015. - № 2.
19. Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Махмудова М.М., Евдулов Д.В. Исследование системы охлаждения элементов радиоэлектронной аппаратуры, работающих в режиме повторно-кратковременных тепловыделений // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. - 2008. - №5.
20. Дульнев Г.Н. Теория тепло- и массообмена. - СПб.: СПбНИУИТМО. - 2012.

References:

1. Anatychuk L.I. Termoelektrichestvo. Termoelektricheskiye preobrazovateli energii. - Kiyev, Chernovtsy: Institut termoelektrichestva, 2003. [Anatychuk L. I. Thermoelectricity. Thermoelectric power converters. - Kyiv, Chernivtsi: Institute of thermoelectricity, 2003.]
2. Anatychuk L.I. Elementnaya baza termoelektrichestva//Doklady IKH Mezghosudarstvennogo seminar "Termoelektriki i ikh primeneniye". - Sankt-Peterburg, 2004. [Anatychuk L. I. Element base of thermoelectricity // Reports of IX Interstate seminar "Thermoelectrics and their application". - St. Petersburg, 2004. (In Russ.)]
3. Anatychuk L.I. O fizicheskikh modelyakh termoelementov // J. Thermoelectricity. - 2003, №1. [Anatychuk L. I. On the physical models of thermoelements // J. Thermoelectricity. - 2003, №1].
4. Bulat L.P. Prikladnyye issledovaniya i razrabotki v oblasti termoelektricheskogo okhlazhdeniya v Rossii// Kholodil'naya tekhnika, 2009. - № 7. [Bulat L. p. Applied research and development in the field of thermoelectric cooling in Russia/ Refrigeration, 2009. - № 7(In Russ.)]
5. Malkovich B.Ye.-SH. Termoelektricheskiye moduli na osnove splavov tellurida vismuta // Doklady XI Mezghosudarstvennogo seminar "Termoelektriki i ikh primeneniye". - Sankt-Peterburg, 2008 [Malkovich B. E.-S. Thermoelectric modules based on alloys of bismuth telluride // Reports XI Interstate workshop "Thermoelectrics and their application". - St. Petersburg, 2008 (In Russ.)].
6. Ssenoga Twaha, Jie Zhu, Yuying An, Bo Li A comprehensive review of thermoelectric technology: Materials, applications, modeling and performance improvement//Renewable and sustainable energy reviews, 2016. - №65.
7. Voronin A.I., Osilkov A.S., Gorbatovskaya T.A. K voprosu o mekhanicheskoy prochnosti vetvey termoelementov na osnove Bi_2Te_3 // Doklady KHI Mezghosudarstvennogo seminar "Termoelektriki i ikh primene-niye". - Sankt-Peterburg, 2008. [Voronin A. I., Selkov A. S., T. A. Gorbatovskaya To the question of mechanical strength of the branches of thermoelements based on Bi_2Te_3 // Reports XI Interstate workshop "Thermoelectrics and their application". - St. Petersburg, 2008].
8. Korzhuev M. A., Avilov E. S., Nezina I. Yu. Non-standard Harman response at the separate measurement of stages of multicascade thermoelectric modules // JEMS. - 2011. - V. 40, №5.
9. Yagov V. V. Possible mechanisms of high-intensity heat transfer in cooling of high temperature surfaces // Materials of the IX International seminar "Heat pipes, heat pumps, refrigeration, power sources". - Minsk. - 2015.
10. Sulin A B, Bogomolov I N Kompresionno-termoelektricheskiye termostaty laboratornogo naznacheniya // Izvestiya vuzov. Priborostroyeniye. - 2008. - №7 [Sulin And B, Bogomolov And N Compression-thermoelectric thermostats laboratory purposes // proceedings of the universities. Instrument making. - 2008. - №7(In Russ.)]

11. Patent RF № 2380787. Termoelektricheskaya batareya / Ismailov T.A., Yevdulov O.V., Yevdulov D.V., 2010. [Patent RF № 2380787. Thermoelectric battery / Ismailov T. A., Avdulov O. V., Avdulov D. V., 2010(In Russ.)]
12. Patent RF № 2379790. Termoelektricheskaya batareya / Ismailov T.A., Yevdulov O.V., Yevdulov D.V., 2010. [Russian patent № 2379790. Thermoelectric battery / Ismailov T. A., Avdulov O. V., Avdulov D. V., 2010(In Russ.)]
13. Patent RF № 2417484. Termoelektricheskaya batareya / Ismailov T.A., Yevdulov O.V., Yevdulov D.V., 2011. [Russian patent № 2417484. Thermoelectric battery / Ismailov T. A., Avdulov O. V., Avdulov D. V., 2011(In Russ.)]
14. Patent RF № 2338299 . Termoelektricheskaya batareya / Ismailov T.A., Yevdulov O.V., Verdiyev M.G., 2007. [Patent RF № 2338299 . Thermoelectric battery, T. Ismailov, O. V. Evdulov, M. G., 2007(In Russ.)]
15. Patent RF № 2338298 . Termoelektricheskaya batareya / Ismailov T.A., Yevdulov O.V., Verdiyev M.G., 2007. [Russian patent № 2338298 . Thermoelectric battery, T. Ismailov, O. V. Evdulov, M. G., 2007 (In Russ.)]
16. Patent RF № 2314663 . Ustroystvo dlya okhlazhdeniya elementov radioelektronnoy apparatury, rabota-yushchikh v rezhime povtorno-kratkovremennykh teplovydeleniy / Ismailov T.A., Yevdulov O.V., Verdiyev M.G., Menafov A.M., 2005. [Patent RF № 2314663 . A device for cooling elements of electronic equipment working in a mode of intermittent heat / Ismailov T. A., Avdulov O. V. Verdiev M. G., Manafov A. M., 2005 (In Russ.)]
17. Patent RF № 2180161 . Ustroystvo dlya termostabilizatsii elementov radioelektronnoy apparatury s vysokimi teplovydeleniyami/ Yevdulov O.V., Ismailov T.A., Yusufov SH.A., Aminov G.I., 2000. [Patent RF № 2180161 Device for thermal stabilization of elements of radioelectronic equipment with high heat/ Evdulov O. V., Ismailov T. A., Yusufov sh., Aminov G. I., 2000(In Russ.)].
18. Evdulov O.V., Evdulov D.V. Teoreticheskiye issledovaniya termoelektricheskogo elementa sloistoy kon-struktsii // Termoelektrichestvo. – 2015. - № 2 [Avdulov O. V., Avdulov D. V. Theoretical study of the thermoelectric element layered structures // journal of thermoelectricity. - 2015. - № 2(In Russ.)]
19. Ismailov T.A., Yevdulov O.V., Makhmudova M.M., Yevdulov D.V. Issledovaniye sistemy okhlazhdeniya ele-mentov radioelektronnoy apparatury, rabotayushchikh v rezhime povtorno-kratkovremennykh teplovydeleniy // Izvestiya vys-shikh uchebnykh zavedeniy Rossii. Radioelektronika. - 2008. - №5. [Ismayilov T. V., Evdulov O. V., Makhmudova M. M., Evdulov D. V. research of cooling system of the elements of the radio-electronic equipment working in the mode of re-short-term heat dissipation // Izvestiya of higher educational institutions of Russia. Radionics. - 2008. - №5 (In Russ.)]
20. Dul'nev G.N. Teoriya teplo- i massoobmena. - SPb.: SPbNIUITMO. - 2012. [Dul'nev G. N. Theory of heat and mass transfer. - SPb.: NRU ITMO. – 2012(In Russ.)].

Сведения об авторах.

Исмаилов Тагир Абдурашидович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теоретической и общей электротехники, заслуженный деятель науки РФ.

Саркаров Таджидин Экберович – доктор технических наук, профессор, кафедра теоретической и общей электротехники.

Казумов Ревшан Шихович – кандидат технических наук, доцент, кафедра теоретической и общей электротехники.

Евдулов Денис Викторович – кандидат технических наук, старший преподаватель, кафедра теоретической и общей электротехники.

Information about the authors.

Tagir A.Ismailov – Dr. Sci.(Technical), Prof., Department of Theoretical and General electrical engineering. Honored worker of science of the Russian Federation.

Tadjedin E.Sarkarov – Dr. Sci.(Technical), Prof., Department of Theoretical and General electrical engineering..

Revshan Sh. Kazumov – Cand. Sci.(Technical), Assoc. Prof., Department of Theoretical and General electrical engineering.

Denis V. Evdulov– Cand. Sci.(Technical), Senior lecturer, Department of Theoretical and General electrical engineering.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию 30.06.2018.

Принята в печать 25.08.2018.

Conflict of interest

Received 30.06.2018.

Accepted for publication 25.08.2018.

Для цитирования: Асланов Т.Г., Ибрагимов С.А. Исследование топологии антенны вивальди с зеркальным расположением лепестков. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2018;45(3):76-84. DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-3-76-84

For citation: Aslanov T.G., Ibragimov S.A. Study of the topology of the Vivaldi antenna with a mirror arrangement of the petals. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2018; 45 (3):76-84. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-3-76-84

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 001.57

DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-3-76-84

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОПОЛОГИИ АНТЕННЫ ВИВАЛЬДИ С ЗЕРКАЛЬНЫМ РАСПОЛОЖЕНИЕМ ЛЕПЕСТКОВ

Асланов Т.Г.¹, Ибрагимов С.А.²

^{1,2}Дагестанский государственный технический университет,

^{1,2}367026, г. Махачкала, пр. Имама Шамиля, 70, Россия,

¹e-mail:tabasik@gmail.com,²e-mail:syltansaid@mail.ru

Резюме. Цель. В работе рассмотрены вопросы исследования топологии антенны Вивальди с зеркальным расположением лепестков. **Метод.** Путем моделирования в программной среде CST MicroWave Studio проведен сбор необходимых данных, в частности, зависимости ширины диаграммы направленности от кривизны и раскрыва (расстояние от середины верхней части антенны до самого лепестка) лепестков антенны. **Результат.** Построены графики зависимости кривизны лепестков и величины раскрыва от ширины диаграммы направленности в двух плоскостях для различных частот. Проведена аппроксимация полученных зависимостей для двух плоскостей $\theta = 90^\circ$ (плоскость антенны) и $\varphi = 0^\circ$ (плоскость, перпендикулярная плоскости антенны). Путем аппроксимации получены аналитические описания зависимостей ширины диаграммы направленности от кривизны и раскрыва лепестков антенны. Проведен анализ поведения кривых зависимостей кривизны и раскрыва лепестков антенны от ширины диаграммы направленности при переходе от одной частоты к другой. Исследована зависимость коэффициента стоячей волны (КСВ) антенны от толщины подложки антенны – тефлона. Исследована зависимость полосы рабочих частот от размеров самой антенны. **Вывод.** Составлена математическая модель, позволяющая в зависимости от заданной частоты и ширины диаграммы направленности, получить необходимую топологию лепестков антенны. Решены задачи построения и оптимизации модели по заданным характеристикам. Выявлены зависимости топологии антенны от ширины диаграммы направленности и от диапазона частот.

Ключевые слова: антенна Вивальди, кривизна, лепесток, аппроксимация, математическая модель, уравнение, диаграмма направленности

TECHNICAL SCIENCE
COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT

STUDY OF THE TOPOLOGY OF THE VIVALDI ANTENNA WITH
A MIRROR ARRANGEMENT OF THE PETALS

Tagirbek G. Aslanov¹, Syltansaid A. Ibragimov²

¹⁻²Daghestan State Technical University,

¹⁻²70 I. Shamilya Ave., Makhachkala 367026, Russia,

¹e-mail:tabasik@gmail.com,²e-mail:syltansaid@mail.ru

Abstract. Objectives In work questions of a research of topology of the antenna of Vivaldi with a mirror arrangement of petals are considered. **Method.** By modeling in the program CST MicroWave Studio environment collecting necessary data, in particular dependence of width of the directional pattern on curvature and a distance from the middle of the top part of the antenna to the petal antenna petals is carried out. **Result.** Graphic dependences of curvature of petals and size of a distance from the middle of the top part of the antenna to the petal on directional pattern width in two planes for various frequencies are constructed. Approximation of the received dependences for two planes $\theta = 90^\circ$ (the antenna plane) and $\varphi = 0^\circ$ is carried out (the plane perpendicular the antenna planes). The equations of the approximating curves for various frequencies are received. The analysis of change of curve dependences of curvature of petals and width of a distance from the middle of the top part of the antenna to the petal from directional pattern width upon transition from one frequency is carried out to another. The dependence of the standing wave ratio (VSWR) of the antenna on teflon thickness is investigated. The dependence of a strip of working frequencies on the sizes of the antenna is investigated. **Conclusion.** Dependences of topology of the antenna on directional pattern width on the range of frequencies of the antenna are revealed. Problems of construction and optimization of model of the set characteristics are solved. The mathematical model allowing depending on the set frequency and width of the directional pattern is received to receive necessary topology of petals of the antenna.

Keywords: Vivaldi antenna, curvature, petal, approximation, mathematical model, equation, radiation pattern

Введение. В настоящее время антенны с расширяющейся щелью (Вивальди) широко используются в различных устройствах, в таких, как станция помех, устройствах радиоразведки, медицинской технике и т.д. Ее популярность вызвана наличием преимуществ относительно других антенн, основными из которых являются: широкий диапазон рабочих частот, несложная конструкция, простые требования к изготовлению, высокий коэффициент усиления [1]. Несмотря на все вышеперечисленные преимущества у такой антенны так же есть недостатки, самым основным из них является отсутствие как таковой методики расчета.

Есть множество работ, которые так или иначе затрагивают данную проблему, но в них отсутствует конкретика и итоговое решение данной проблемы. [3-5, 7-15] На данный момент параметры подобных антенн подбираются эмпирически с помощью программных комплексов электродинамического моделирования таких, как CST Microwave Studio и HFSS Microwave Office [2].

Постановка задачи. При исследовании топологии антенны Вивальди необходимо решить ряд задач:

1. Построить и оптимизировать модель антенны Вивальди с помощью программных комплексов электродинамического моделирования;
2. Определить от каких параметров антенны зависит ее ширина диаграммы направленности и в каком диапазоне частот КСВ не превышает заданного значения;
3. Собрать статистический материал;
4. Проанализировать полученные данные и выявить зависимости;
5. Формализовать полученные зависимости.

Методы исследования. Для описания кривых лепестков антенны Вивальди воспользуемся уравнением [6]:

$$\begin{cases} x = x_1 + k(x_2 - x_1); \\ y = \left(\frac{e^{R(x_1 + k(x_2 - x_1))} (y_2 - y_1) + y_1 e^{Rx_2} - y_2 e^{Rx_1}}{e^{Rx_2} - e^{Rx_1}} \right). \end{cases} \quad (1)$$

где: R – кривизна лепестков антенны;

y_1 – перекрытие лепестков антенны относительно оси абсцисс;

y_2 – раскрыв антенны, определяемый расстоянием от середины верхней части антенны до самого лепестка;

x – переменная, изменяемая в пределах от 0 до x_2 , определяющую функцию y , задающую изменение кривой лепестка от перекрытия до раскрыва антенны;

x_1 – переменная, задающая нижнюю точку начала лепестка;

x_2 – высота лепестка и высота всей антенны;

k – коэффициент.

Предполагается, что антенна реализована в виде полоски, с толщиной диэлектрического материала (тефлона), равной 0,5 мм, на которую нанесен проводящий слой в виде лепестков с экспоненциально зависимыми кривыми.

Зададимся перекрытием лепестков $2y_1 = 1,2$ мм. Будем считать, что начало лепестка размещена в нижней части полоска, что соответствует значению $x_1 = 0$.

Подставив полученные значения в уравнение (1), определяющее топологию лепестка y , получим:

$$y = \left(\frac{e^{Rx} (y_2 + 0,6) - 0,6e^{Rx_2} - y_2}{e^{Rx_2} - 1} \right), \quad (2)$$

Модель реализована в программной среде CST MicroWave Studio.

На рис.1 приведена оптимизированная антенна Вивальди со следующими параметрами $x_2 = 120$ мм; $y_2 = 20$ мм; $R = 0,08$. Следует отметить, что оба лепестка антенны симметричны друг другу относительно оси абсцисс.

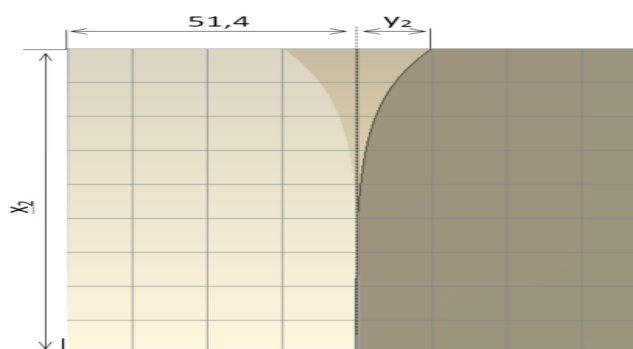


Рис.1. Топология антенны Вивальди

Fig.1. Vivaldi antenna topology

Толщина тефлона была выбрана в результате проведенных исследований зависимости КСВ антенны от ее толщины. В качестве примера на рис. 2 показана зависимость КСВ от толщины тефлона, где цифры 1, 2, 3 соответствуют толщине 0,22 мм, 0,5 мм, 0,7 мм.

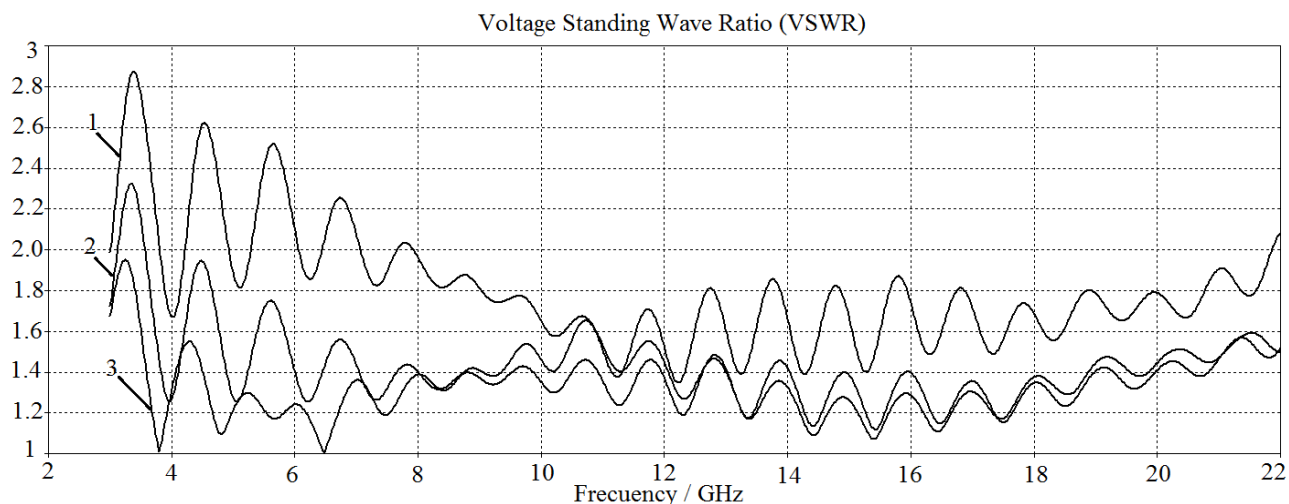


Рис.2. Зависимость коэффициента стоячей волны (КСВ) антенны от толщины тефлона
Fig. 2 The dependence of the standing wave ratio of the antenna on the thickness of Teflon

Из рис.2 видно, что при увеличении толщины, КСВ на нижних частотах уменьшается, но растет на высоких, при уменьшении толщины происходит обратное. В результате оптимизации была получена нужная толщина тефлона 0,5 мм.

Была исследована зависимость диапазона рабочих частот от размеров антенны. Методом моделирования были получены данные значения КСВ при изменении ширины и высоты антенны, а так же пропорционального изменения ширины и высоты антенны.

Так, при изменении ширины антенны КСВ уменьшалось в области низких частот до определенного уровня, в области высоких частот как такового изменения не наблюдалось. При изменении высоты антенны, изменения КСВ происходили как в области низких частот, так и в области высоких. Наибольший эффект был получен при пропорциональном изменении ширины и высоты антенны. На рис. 3 показано изменение КСВ в зависимости от размеров антенны, где кривой 1 соответствует в полтора раза увеличенная по сравнению с рис. 1 антенна, кривой 2 – исходная антенны, а кривой 3 – в полтора раза уменьшенная по сравнению с рис. 1 антенна. Из рис. 3 видно, что при увеличении размеров антенны диапазон частот смещается в сторону низких частот, а при уменьшении – обратное.

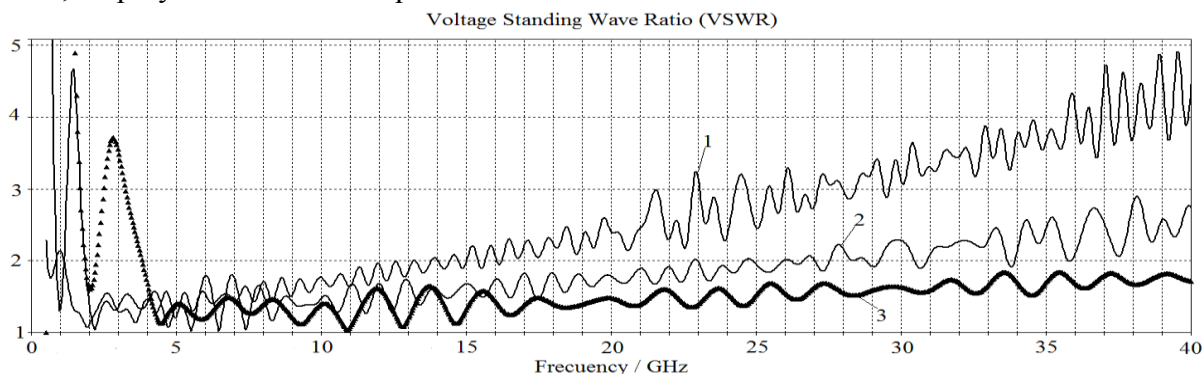


Рис.3. Изменение значения КСВ в зависимости от размеров антенны
Fig.3. Change in the value of the standing wave ratio depending on the size of the antenna

Для того чтобы привязать зависимость диапазона рабочих частот от размеров антенны был введен коэффициент d . Для диапазона частот от 3 до 24 ГГц $d = 1$, при $d < 1$ диапазон смещается в сторону высоких частот, а когда $d > 1$ – диапазон смещается в сторону низких частот. Таким образом уравнение (2) примет вид:

$$y = \left(\frac{e^{Rx} (y_2 + 0,6) - 0,6e^{Rx_2} - y_2}{e^{Rx_2} - 1} \right) d. \quad (3)$$

В процессе моделирования было установлено, что диаграмма направленности антенны зависит от кривизны лепестков R и их раскрыва y_2 . Был осуществлен сбор данных зависимости диаграммы направленности от кривизны лепестков антенны и раскрыва в двух плоскостях $\theta = 90^\circ$ (плоскость антенны) и $\varphi = 0^\circ$ (плоскость перпендикулярная плоскости антенны), в диапазоне частот от 3 до 24 ГГц, при этом значения y_2 менялись от 10 до 50, а значения R от 0,01 до 0,16, при этих значениях КСВ не превышало 2.

После обработки данных были получены отсчеты кривой зависимостей ширины диаграммы направленности от кривизны лепестка R и ее раскрыва y_2 , для частот 3, 8, 14, 19 и 24 ГГц в плоскости $\theta = 90^\circ$ и для частот 3, 4, 5,5, 6, 6,5, 7, 8, 14, 19 и 24 ГГц в плоскости $\varphi = 0^\circ$. Полученные выборки были аппроксимированы соответствующими кривыми. При аппроксимации обеих зависимостей коэффициент детерминации был выше 0,98.

На рис. 4 для плоскости $\theta = 90^\circ$ и рис. 5 для плоскости $\varphi = 0^\circ$, представлены кривые зависимости ширины диаграммы направленности Q от кривизны лепестка антенны R (рисунок 4а и рисунок 5а) и раскрыва антенны y_2 (рис.4б и рис.5б) для диапазона частот от 3 до 24 ГГц. На рис. 4, кривой 1 соответствует частота 3 ГГц, кривой 2 – 8 ГГц, кривой 3 – 14 ГГц, кривой 4 – 19 ГГц и кривой 5 – 24 ГГц.

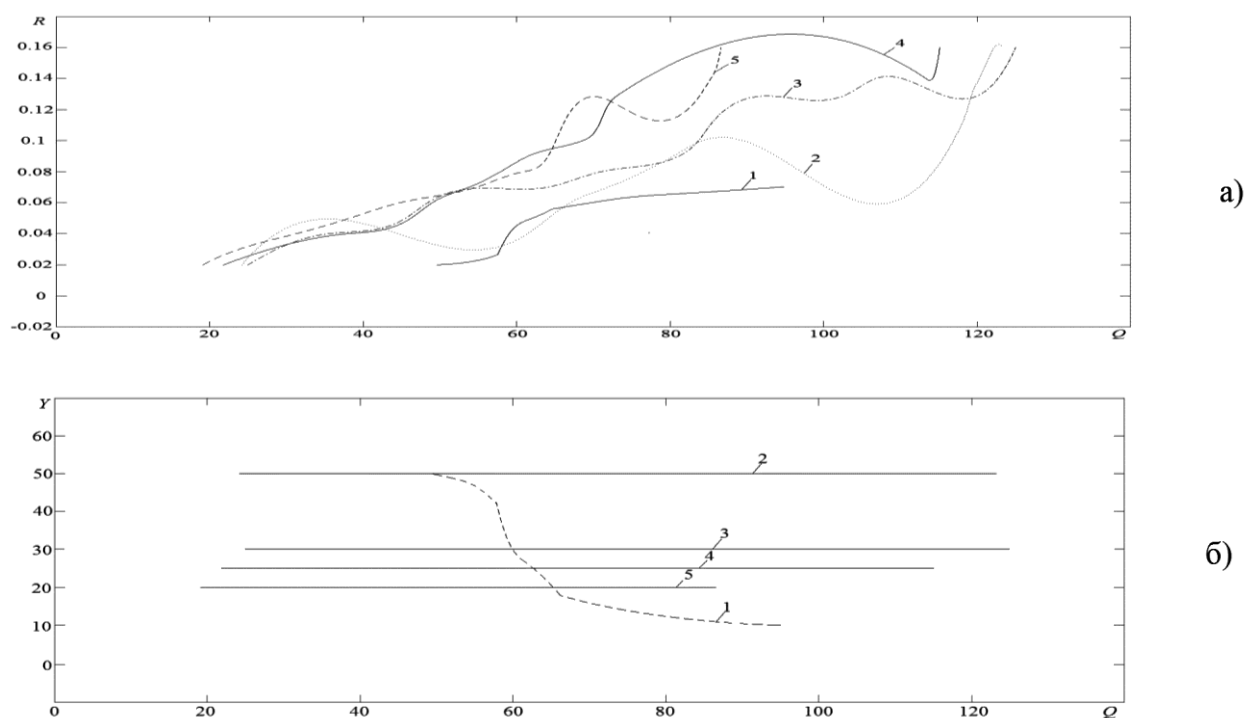


Рис.4. Кривые зависимости ширины диаграммы направленности Q от кривизны R и раскрыва y_2 для плоскости $\theta = 90^\circ$

Fig. 4. Curves of the width of the Q pattern from the curvature R and opening y_2 for the plane $\theta = 90^\circ$

На рис. 5, кривой 1 соответствует частота 3 ГГц, кривой 2 – 4 ГГц, кривой 3 – 5,5 ГГц, кривой 4 – 6 ГГц, кривой 5 – 6,5 ГГц, кривой 6 – 7 ГГц, кривой 7 – 8 ГГц, кривой 8 – 14 ГГц, кривой 9 – 19 ГГц и кривой 10 – 24 ГГц.

Из рис. 4а видно, что для всех частот с увеличением значения кривизны лепестков увеличивается ширина диаграммы направленности. А из рис. 5а видно, что данная зависимость не соблюдается, в связи с чем, пришлось провести дополнительный сбор статистического материала для диапазона частот от 3 до 8 ГГц и исследовать зависимости еще для 5 частот. Так на частотах 3, 4 ГГц с ростом кривизны падает значение ширины диаграммы направленности, а при частоте 5,5 ГГц сохраняя кривизну постоянной, диаграмма направленности зависит только от раскрыва лепестков антенны. Начиная с частоты 6 ГГц и выше, с ростом кривизны растет и значение ширины диаграммы направленности.

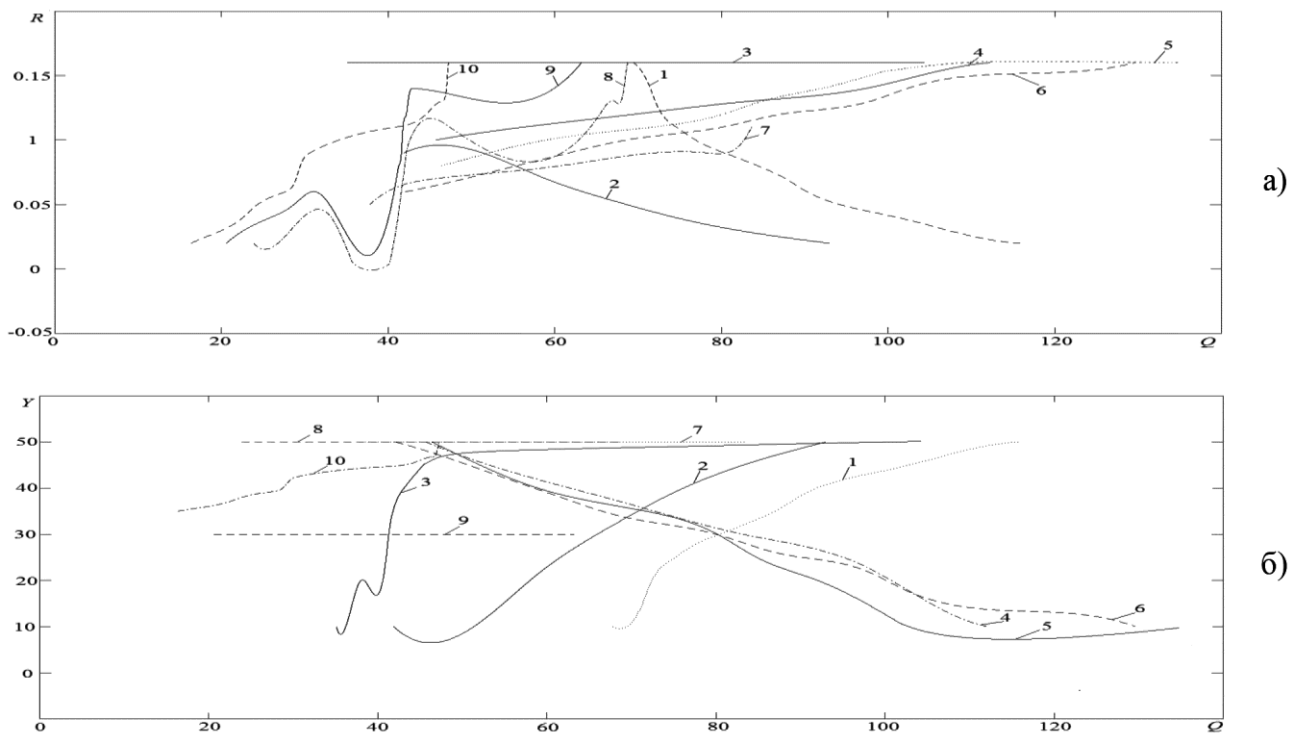


Рис.5. Кривые зависимости ширины диаграммы направленности Q от кривизны R и раскрыва y_2 для плоскости $\varphi = 0^\circ$

Fig.5. Curves of the width of the Q pattern from the curvature R and opening y_2 for the plane $\varphi = 0^\circ$

Полученные кривые описываются соответствующими уравнениями, коэффициенты в которых подобраны с помощью программы MATLAB и приведены в табл. 1.

Полученные уравнения дают возможность вычислить значения кривизны и раскрыва антенны для заданной ширины диаграммы направленности не только для рассмотренных выше частот, но и для всего диапазона.

Для этого необходимо использовать весовые коэффициенты, с помощью которых можно будет учитывать влияние соседних частот на, искомую.

Например, если необходимо узнать значения R и y_2 с заданной Q на частоте 11 ГГц в плоскости $\theta = 90^\circ$, необходимо определить уравнения каких соседних частот нам известны, в данном случае это частоты 8 и 14 ГГц. Так как 11 ГГц расположена в равной отдаленности от этих частот весовые коэффициенты будут равны 0.5.

Необходимо подставить в уравнения этих частот значение Q после чего полученные значения R и y_2 умножить на весовой коэффициент 0,5 и сложить друг с другом, в результате чего мы получим значения R и y_2 для искомой частоты. Если бы в качестве искомой частоты была задана 12 ГГц то весовой коэффициент для 8 ГГц равен 0,4, а для 14 ГГц – 0,6.

Опишем все это уравнениями:

$$k_1 = 1/(F_2 - F_1) * (F_2 - F_x);$$

$$k_2 = 1/(F_2 - F_1) * (F_x - F_1);$$

$$R_x = k_1 R_1 + k_2 R_2.$$

где: k_1, k_2 – весовые коэффициенты верхней и нижней частоты соответственно;
 F_1, F_2 – верхняя и нижняя частоты соответственно, между которыми находится искомая частота;
 F_x – искомая частота;
 R_1, R_2 – уравнения зависимости кривизны лепестков антенны от ширины диаграммы направленности для верхней и нижней частот, соответственно;
 R_x – кривизна антенны, которую необходимо найти для искомой частоты.

Таблица 1. Уравнения зависимости регулируемого параметра от ширины диаграммы направленности Q

Table 1. Equations of dependence of the controlled parameter on the width of the Q pattern

Частота, ГГц Frequency, GHz	Плоскость plane	Регулируемый параметр Adjustable parameter	Уравнения зависимости регулируемого параметра от ширины диаграммы направленности Q Equations of dependence of adjustable parameter on width Q pattern
3	$\theta = 90^\circ$	R	$2.022/(39.26 + e^{-0.3205 \cdot Q + 22.88}) + 0.01734$
		y_2	$-11.5/(0.28 + e^{-0.35 \cdot Q + 20}) + 51$
	$\varphi = 0^\circ$	R	$4.2 \cdot e^{-0.049 \cdot Q} + 0.0085$
		y_2	$47.29/(13.22 + e^{-0.1643 \cdot Q + 13.11}) \cdot Q^{0.6452} - 26.23$
4	$\theta = 90^\circ$	R	Зависимость не исследовалась Equations of dependence of adjustable parameter on width
		y_2	Зависимость не исследовалась Equations of dependence of adjustable parameter on width
	$\varphi = 0^\circ$	R	$-e^{0.05022 \cdot Q - 5.61} \cdot \cos(0.01422 \cdot Q) + 0.1167$
		y_2	$0.46/(0.01 + e^{-0.1068 \cdot Q + 2.422}) + \cos(0.01 \cdot Q) + 5.255$
5,5	$\theta = 90^\circ$	R	Зависимость не исследовалась Equations of dependence of adjustable parameter on width
		y_2	Зависимость не исследовалась Equations of dependence of adjustable parameter on width
	$\varphi = 0^\circ$	R	принимает постоянное значение на всем диапазоне Q и равен 0,16 Takes a constant value over the entire Q range and is equal to 0,16
		y_2	$0.4043/(0.009123 + e^{-0.4043 \cdot Q + 11.61}) + 5.854$
6	$\theta = 90^\circ$	R	Зависимость не исследовалась Equations of dependence of adjustable parameter on width
		y_2	Зависимость не исследовалась Equations of dependence of adjustable parameter on width
	$\varphi = 0^\circ$	R	$e^{0.01007 \cdot Q - 1.176} + \cos(0.009273 \cdot Q) - 1.3$
		y_2	$-e^{0.007152 \cdot Q + 3.865} + \cos(0.06194 \cdot Q) + 116.3$
6,5	$\theta = 90^\circ$	R	Зависимость не исследовалась Equations of dependence of adjustable parameter on width
		y_2	Зависимость не исследовалась Equations of dependence of adjustable parameter on width
	$\varphi = 0^\circ$	R	$e^{0.0131 \cdot Q - 2.575} \cdot \cos(0.008 \cdot Q) - 0.05$
		y_2	$-e^{0.0129 \cdot Q + 3.7} \cdot \cos(0.008 \cdot Q) + 118.5$
7	$\theta = 90^\circ$	R	Зависимость не исследовалась Equations of dependence of adjustable parameter on width
		y_2	Зависимость не исследовалась Equations of dependence of adjustable parameter on width
	$\varphi = 0^\circ$	R	$e^{-0.003346 \cdot Q - 6.138} \cdot Q - 0.01929$
		y_2	$-e^{-0.003346 \cdot Q - 0.1466} \cdot Q + 81.72$
8	$\theta = 90^\circ$	R	$e^{0.1668 \cdot Q - 22.86} - 0.1747 \cdot \cos(0.02666 \cdot Q + 0.425) + 5.61/Q - 0.128$
		y_2	принимает постоянное значение на всем диапазоне Q и равен 50 Takes a constant value over the entire Q range and is equal to 50
	$\varphi = 0^\circ$	R	$6.634/(1.165 + e^{-0.02 \cdot Q + 1}) + \cos(0.028 \cdot Q) - 3.158$
		y_2	принимает постоянное значение на всем диапазоне Q и равен 50 Takes a constant value over the entire Q range and is equal to 50
14	$\theta = 90^\circ$	R	$e^{0.02318 \cdot Q - 2.462} + 1.147 \cdot \cos(0.00347 \cdot Q + 2.002) \cdot e^{0.02318 \cdot Q - 2.462} - 0.04$
		y_2	принимает постоянное значение на всем диапазоне Q и равен 30 Takes a constant value over the entire Q range and is equal to 30
	$\varphi = 0^\circ$	R	$-0.001395/(0.02634 + 16.11 \cdot e^{3.703 \cdot Q - 161.1}) + e^{0.009877 \cdot Q} \cdot 0.06274 - 0.03668/(Q - 70)$
		y_2	принимает постоянное значение на всем диапазоне Q и равен 50 Takes a constant value over the entire Q range and is equal to 50
19	$\theta = 90^\circ$	R	$e^{0.001817 \cdot Q - 0.2168} - 0.0002511 \cdot \cos(0.09155 \cdot Q + 2.568) \cdot e^{0.001817 \cdot Q - 0.2168} \cdot Q - 0.8153$
		y_2	принимает постоянное значение на всем диапазоне Q и равен 25 Takes a constant value over the entire Q range and is equal to 25
	$\varphi = 0^\circ$	R	$-0.098/(1.42 + 0.06001 \cdot e^{3.24 \cdot Q - 132}) + 0.0014 \cdot Q + 0.07274$
		y_2	принимает постоянное значение на всем диапазоне Q и равен 30 Takes a constant value over the entire Q range and is equal to 30
24	$\theta = 90^\circ$	R	$e^{0.2497 \cdot Q - 23.18} + 0.01427 \cdot \cos(0.02 \cdot Q - 0.4038) \cdot e^{0.06199 \cdot Q} + \cos(0.02 \cdot Q - 0.4038) - 1.028$
		y_2	принимает постоянное значение на всем диапазоне Q и равен 20 Takes a constant value over the entire Q range and is equal to 20
	$\varphi = 0^\circ$	R	$-0.00083 \cdot \sin(0.16 \cdot Q + 0.42) \cdot e^{0.116 \cdot Q} + 0.000018 \cdot Q + 0.0116 + 0.0014 \cdot e^{0.1159 \cdot Q} - 0.0007$
		y_2	$-0.0887 \cdot \sin(0.16 \cdot Q + 0.4168) \cdot e^{0.116 \cdot Q} + 34.1 + 0.0028 \cdot Q - 0.083 - 0.001 + 0.15 \cdot e^{0.1159 \cdot Q}$

Аналогичным способом можно найти значение раскрыва лепестков антенны y_2 для иско- мой частоты, достаточно вместо R подставить соответствующие значения y_2 .

Обсуждение результатов. В результате выполненной работы были изучены зависимости для антенны Вивальди с зеркальным расположением лепестков. Исследование показало, что по- лоса рабочих частот антенны зависит, как от размеров антенны, так и от толщины тефлона между лепестками, данная особенность несвойственна для другого вида антенны Вивальди, где оба ле- пестка расположены на одной стороне полоска.

Получена база данных зависимости ширины диаграммы направленности от кривизны и раскрыва антенны, где наглядно видно пошаговое изменение параметров и реакцию ширины диаграммы направленности на эти изменения. Получены уравнения для всех исследуемых частот и так же выведены формулы для нахождения промежуточных частот. Из полученных уравнений видно, что в каждой из них присутствует экспоненциальная зависимость, что так же характерно и для уравнения (3), которое определяет топологию лепестков антенны.

Вывод. Таким образом, мы получили математическую модель, описанную для всего диа- пазона частот, что позволяет нам, задав необходимую ширину диаграммы направленности и ча- стоту, получить соответствующую топологию антенны Вивальди без каких либо оптимизаций и настроек. При проверке модели на адекватность средняя относительная погрешность не превы- шала 3%. Полученная математическая модель дает возможность, подставляя в уравнения задан- ное значение ширины диаграммы направленности Q , получить значения кривизны и раскрыва антенны для различных частот. В итоге, подставив эти значения в уравнение (3) можно построить антенну Вивальди с нужной топологией.

Библиографический список:

1. C. Fairclough. Анализ конструкции антенны Вивальди [Электронный ресурс]. 2015 г. Режим доступа: <https://www.comsol.ru/blogs/vivaldi-antenna-design-analysis/>. Дата обращения 11.04.2018.
2. TSA, или антенна Вивальди [Электронный ресурс]. 2014 г. Режим доступа: <http://dl2kq.de/ant/3-90.htm>. Дата обращения 13.04.2018.
3. Банков С.Е., Курушин А.А. Расчет антенн и СВЧ структур с помощью HFSS Ansoft– М, ЗАО «НПП «РОД- НИК», 2009, 256 с.
4. Чернышев С.Л., Виленский А.Р., Сю С., Люй С., Лю Ю. Разработка и исследование модифицированной антенны Вивальди в составе плоской широкополосной антенной решётки X-диапазона [Электронный ресурс]. 2011 г. Режим доступа: <http://technomag.edu.ru/doc/247762.html>. Дата обращения 03.04.2018.
5. Виленский А.Р. Метод анализа пространственно-временных характеристик излучения печатных щеле- вых антенн бегущей волны // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. Журн. 2014. № 5. С. 139-154. Режим доступа : <http://technomag.bmstu.ru/doc/710740.html>
6. Maaskant R., Analytical and Numerical Modeling of Currents on Vivaldi Antennas for Radio Astronomy, AS- TRON Eindhoven University of Technology - 100p. 2003
7. A. Mehdipour, K. Mohammadpour-Aghdam and R. Faraji-Dana, “Complete dispersion analysis of vivaldi antenna for ultra wideband applications” Progress In Electromagnetics Research, PIER 77, 85–96, 2007.
8. S. Lin, S. Yang, A. E. Fath, “Development of a novel uwb vivaldi antenna array using siw technology” Progress In Electromagnetics Research, PIER 90, 369–384, 2009.
9. E. Gazit, “Improved design of the Vivaldi antenna”, IEE Proc., Vol.135, Pt.H, No.2, pp. 89-92, 1988
10. S. Zhong, X. Yan, X. Liang, “UWB planar antenna technology” Front. Electr. Electron. Eng. China, 3(2): 136– 144, 2008. DOI: 10.1007/s11460-008-0036-0
11. XiaoXiang He, Teng Chen, and XinWang, “A Novel Low RCS Design Method for X-Band Vivaldi Antenna” Front. Electr. Hindawi Publishing Corporation International Journal of Antennas and Propagation Volume, Article ID 218681, 6 pages, 2012. DOI: 10.1155/2012/218681
12. Sang-Gyu Kim, Kai Chang, “A low cross-polarized antipodal Vivaldi antenna array for wideband operation,” Antennas and Propagation Society International Symposium, Volume 3, June 2004, pp. 2269-2272.
13. N. Hamzah, K.A. Othman “Designing Vivaldi Antenna with Various Sizes using CST Software” Proceedings of the World Congress on Engineering 2011 Vol II WCE 2011, July 6 - 8, 2011, London, U.K.
14. P. J. Gibson, —*The Vivaldi Aerial*, Proc. 9th Europe Microwave. Conference., 1979, pp. 101–105.
15. James Joseph Fisher, “*Vivaldi Antenna*”, World Intellectual Property Organization, Aug.8, 2006.

References:

1. C. Fairclough. Analysis of the design of the antenna Vivaldi [Electronic resource]. 2015 Access mode: <https://www.comsol.ru/blogs/vivaldi-antenna-design-analysis/>. Date of circulation 04/11/2018.

2. TSA, ili antenna Vival'di [Elektronnyy resurs]. 2014 g. Rezhim dostupa: <http://dl2kq.de/ant/3-90.htm>. Data obrashcheniya 13.04.2018. [TSA, or Vivaldi's antenna [Electronic resource]. 2014 г. Access mode: <http://dl2kq.de/ant/3-90.htm>. Date of circulation 04/13/2018]
3. Bankov S.Ye., Kurushin A.A. Raschet antenn i SVCH struktur s pomoshch'yu HFSS Ansoft– M, ZAO «NPP «RODNIK», 2009, 256 s. [Banks S.E, Kurushin AA Calculation of antennas and microwave structures using HFSS Ansoft-M, ZAO NPP "RODNIK", 2009, 256 p].
4. Chernyshev S.L., Vilenskiy A.R., Syu S., Lyuy S., Lyu YU. Razrabotka i issledovaniye modifitsi-rovannoy antennoy Vival'di v sostave ploskoy shirokopolosnoy antennoy reshotki KH-diapazona [Elektronnyy resurs]. 2011 g. Rezhim dostupa: <http://technomag.edu.ru/doc/247762.html>. Data obrashcheniya 03.04.2018. [Chernyshev S.L., Vilenskiy A.R., Syu S., Liu S., Liu Yu. Development and investigation of the modified Vivaldi antenna in the flat broadband X-band antenna array [Electronic resource]. 2011 Access mode: <http://technomag.edu.ru/doc/247762.html>. Date of circulation 04/03/2018.]
5. Vilenskiy A.R. Metod analiza prostranstvenno-vremennykh kharakteristik ishlucheniya pechatnykh shchelevykh antenn begushchey volny // Nauka i obrazovaniye. MGTU im. N.E. Bauman. Elektron. Zhurn. 2014. № 5. S. 139-154. Rezhim dostupa : <http://technomag.bmstu.ru/doc/710740.html> [Vilenskiy A.R. A method for analyzing the space-time characteristics of propagation of printed slit antennas of a traveling wave // Science and Education. MSTU them. N.E. Bauman. Electron. Jour. 2014. No. 5. pp. 139-154. Access mode: <http://technomag.bmstu.ru/doc/710740.html>].
6. Maaskant R., Analytical and Numerical Modeling of Currents on Vivaldi Antennas for Radio Astronomy, AS-TRON Eindhoven University of Technology - 100p. 2003
7. A. Mehdipour, K. Mohammadpour-Aghdam and R. Faraji-Dana, "Comprehensive dispersion analysis of vivaldi antennas for ultra wideband applications". Progress in Electromagnetics Research, PIER 77, 85-96, 2007.
8. S. Lin, S. Yang, A. E. Fath, "Development of a novel uwb vivaldi antenna array using siw technology". Progress in Electromagnetics Research, PIER 90, 369-384, 2009.
9. E.Gazit, "Improved design of the Vivaldi antenna", IEE Proc., Vol.135, Pt.H, No.2, pp. 89-92, 1988
10. S. Zhong, X. Yan, X. Liang, "UWB planar antenna technology" Front. Electr. Electron. Eng. China, 3 (2): 136-144, 2008. DOI: 10.1007 / s11460-008-0036-0
11. XiaoXiang He, Teng Chen, and XinWang, "A Novel Low RCS Design Method for X-Band Vivaldi Antenna" Front. Electr. Hindawi Publishing Corporation International Journal of Antennas and Propagation Volume, Article ID 218681, 6 pages, 2012. DOI: 10.1155 / 2012/218681
12. Sang-Gyu Kim, Kai Chang, "A low cross-polarized antipodal Vivaldi antenna array for wideband operation," Antennas and Propagation Society International Symposium, Volume 3, June 2004, pp. 2269-2272.
13. N. Hamzah, K.A. Othman "Designing Vivaldi Antenna with Various Sizes using CST Software" Proceedings of the World Congress on Engineering 2011 Vol II WCE 2011, July 6 - 8, 2011, London, U.K.
14. P. J. Gibson, The Vivaldi Aerial, Proc. 9th Europe Microwave. Conference., 1979, pp. 101-105.
15. James Joseph Fisher, "Vivaldi Antenna", World Intellectual Property Organization, Aug.8, 2006. dostupa: <https://www.comsol.ru/blogs/vivaldi-antenna-design-analysis/>. Data obrashcheniya 11.04.2018.

Сведения об авторах:

Асланов Тагирбек Гайдарбекович – кандидат технических наук, докторант.

Ибрагимов Султансайд Абдуллагаджиевич – аспирант.

Information about the authors.

Tagirbek G. Aslanov – Cand. Sci. (Technical), Doctoral cand., Department «Management and Informatics in Technical Systems and Computer Engineering».

Syltansaid A. Ibragimov – Postgraduate student.

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 28.05.2018.

Принята в печать 29.08.2018.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 28.05.2018.

Accepted for publication 29.08.2018.

Для цитирования: Багутдинов Р.А. Подход к обработке, классификации и обнаружению новых классов и аномалий в разнородных и разномасштабных потоках данных. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2018;45 (3): 85-93. DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-3-85-93

For citation: Bagutdinov R.A. Approach of processing, classification and detection of new classes and anomalies in heterogeneous and different streams of data. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2018; 45(3):85-93. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-3-85-93

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 004.04(004.6, 303.732)

DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-3-85-93

ПОДХОД К ОБРАБОТКЕ, КЛАССИФИКАЦИИ И ОБНАРУЖЕНИЮ НОВЫХ КЛАССОВ И АНОМАЛИЙ В РАЗНОРОДНЫХ И РАЗНОМАСШТАБНЫХ ПОТОКАХ ДАННЫХ

Багутдинов Р.А.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
634050, г.Томск, просп. Ленина, 30, Россия,
e-mail:lravil_bagutdinov@yahoo.com

Резюме. Цель. Целью исследования является поиск эффективных методов и подходов к обработке разнородных потоков данных и управления задачами бесконечной длины, концептуальной эволюции и концептуального дрейфа. Поток разнородных данных может иметь бесконечную длину и содержать структурированные или неструктурированные данные. Обработка разнородного и разномасштабного потока данных представляет собой основную проблему для исследователей. Большая часть исследований сосредоточена на решении проблемы бесконечной длины и концепции-дрейфа. **Метод.** Новые стратегии обнаружения класса классифицируются как параметрические и непараметрические. Данная работа основана на непараметрическом подходе. Классификатор работает на ансамбле трех моделей. Разделение генерирует различное количество классов в каждом фрагменте. Классы вычисляются путем применения метода К-медоидной кластеризации на каждом фрагменте. Эффективность метода К-медоидной кластеризации больше подходит для набора данных, содержащего аномалии. **Результат.** Разработанный алгоритм способен обрабатывать разнородные и разномасштабные данные. Каждый экземпляр, присутствующий в модели, принадлежит только одному классу. Экспериментальная работа была выполнена на четырех выборках потоковых данных по 2000 строк. После выполнения предварительной обработки в наборе данных были обнаружены многозначные характеристики данных. **Вывод.** В данной работе представлен эффективный подход для обработки разнородных потоков данных и управления задачами бесконечной длины, концептуальной эволюции и концептуального дрейфа. Разработанный подход основан на параметре сопоставления строк вместо расстояния для обработки четырех задач потоков данных. Уровень ложных срабатываний в разработанном алгоритме довольно низок и может считаться незначительным. Подход не классифицирует новый экземпляр класса как существующий класс, но может эффективно обрабатывать функциональную эволюцию.

Ключевые слова: поток данных, интеллектуальный анализ данных, разнородные данные, разномасштабные данные, обработка данных

TECHNICAL SCIENCE
COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT

APPROACH OF PROCESSING, CLASSIFICATION AND DETECTION OF NEW CLASSES
AND ANOMALIES IN HETEROGENIOUS AND DIFFERENT STREAMS OF DATA

Ravil A. Bagutdinov

Tomsk Polytechnic University,
30 Lenina Ave., Tomsk 634050, Russia,
e-mail: lravil_bagutdinov@yahoo.com

Abstract. Objectives The aim of the study is to search for effective methods and approaches to the processing of heterogeneous data streams and the management of problems of infinite length, conceptual evolution and conceptual drift. A heterogeneous data stream can have infinite length and contain structured or unstructured data. Processing a heterogeneous and multi-scale data flow is a major challenge for researchers. Most of the research focuses on solving problems of infinite length and concept-drift. **Method.** New class detection strategies are classified as parametric and non-parametric. This work is based on a non-parametric approach. The classifier works on the ensemble of three models. The separation generates a different number of classes in each fragment. Classes are calculated by applying the K-Medoid clustering method on each fragment. The effectiveness of the K-media clustering method is more suitable for a data set containing anomalies. **Result.** The developed algorithm is capable of processing heterogeneous and multi-scale data. Each instance that is present in the model belongs to only one class. Experimental work was performed on four samples of stream data of 2000 lines each. After performing the pre-processing, the multi-valued characteristics of the data were found in the data set. **Conclusion.** This paper presents an effective approach for processing heterogeneous data streams and managing tasks of infinite length, conceptual evolution and conceptual drift. The developed approach is based on the string matching parameter instead of the distance for processing the four tasks of data streams. The level of false positives in the developed algorithm is rather low and can be considered insignificant. The approach does not classify a new instance of the class as an existing class, but can effectively handle the functional evolution.

Keywords: data flow, data mining, heterogeneous data, multiscale data, data processing

Введение. С развитием информационных технологий количество данных, генерируемых по каналам связи различных цифровых устройств, экспоненциально возрастают. Первоначально было сложно хранить и обрабатывать данные, генерируемые по каналу связи, но в настоящее время существует множество работ отечественных и зарубежных ученых, которые разработали методики и подходы для преодоления этого ограничения. Данные, сгенерированные в текстовом, аудио-, видеоформате и текущие от одного сетевого узла к другому, без прерывания, определяются как поток разнородных данных [1]. Основными характеристиками потоковых данных являются: непрерывность, динамический характер и неопределенный формат. Эти параметры постоянно меняются, что затрудняет процесс обработки. Ниже более подробно перечислены основные затруднения при обработке таких данных:

1. Поток данных генерируется с очень высокой скоростью и бесконечен по размеру. Сложно хранить и обрабатывать такой поток данных.
2. Предполагается, что дрейф присутствует, когда поток данных изменяется по времени. Это изменение заставляет исходным данным переходить (дрейфовать) от одних параметров и характеристик к другим.
3. Концептуальная эволюция возникает, когда новые данные эволюционируют в более новые данные. Например, эволюция происходит, когда обнаружен новый класс сигнатур вируса или обнаружен новый класс сетевой атаки. Такой эволюцией во время выполнения трудно управлять любой системой.

4. Функциональная эволюция - длительный процесс. Новая функция начинает появляться в потоке из-за концепции дрейфа и эволюции концепции. Эволюция новой функции влияет на существующие функции, и с течением времени в системе наблюдаются существенные изменения.

Статические методы классификации данных не могут использоваться при обработке потоков данных. Необходимо предложить эффективные методы и подходы классификации, которые подходят для решения задач потока данных [2,3]. Ниже приводятся основные проблемы и решения, существующие вместе с предлагаемым решением:

1. Проблема бесконечной длины: модели инкрементного обучения, в которых используется метод инкрементной обработки гибридной партии данных. Этот метод подразумевает разбиение потоков данных на кластеры одинаковых размеров для последующей их обработки.
2. Проблема дрейфа концепции: эту проблему можно выявить, отслеживая изменения, происходящие в потоковых данных. Изменения, происходящие в потоковых данных, являются переменными и обрабатываются моделями данных, которые требуют регулярных обновлений в соответствии с изменениями в потоковых данных. Здесь в основном применяется частичное решение. Изменчивость моделируется путем изменения количества классов данных, что позволяет системе обрабатывать новый класс данных.
3. Проблема эволюции концепции: в данной работе мы попытались решить эту проблему, позволяя классификатору автоматически определять новый класс без предварительной подготовки к новому классу.
4. Функциональная эволюция. Предлагаемое решение основано на операции сравнения строк. Сравниваются взаимодействие различных моделей, в которых обнаружены новые данные от каждой модели и выявляются аномалии в данных [4]. Вычисляется ошибка, которую используется для разделения экземпляров на основе их появления, т. е. концепции-эволюции, концепции дрейфа или шума. Новая функция используется для обновления существующей модели, чтобы она могла справляться с проблемами потоковой передачи данных.

Постановка задачи. Для решения задачи бесконечной длины и концепции дрейфа зарубежными учеными были предложены различные инкрементные подходы. В их числе: одноэтапный инкрементный подход и гибридный пакетный инкрементный подход. В инкрементном подходе для классификации используется только одна модель, которая динамически обновляется с регулярным временным интервалом. Гибридный инкрементный подход основан на совокупности разных моделей и методов пакетного обучения [5]. В этом подходе модель создается из последних данных и основана на эффективности классификации. Подход гибридной модели упрощает реализацию и обновление [6].

Выявление аномалий определяется как расстояние, измеренное между значением данных и всех других значений данных в случайной выборке данных. Проблема эволюции может быть решена путем выявления этих аномалий из данных.

Аномалии происходят в потоковых данных по таким причинам, как шум, эволюция концепции или дрейф концепции [7]. Необходимо выявить причины возникновения таких аномалий. Это позволит избежать ошибочной классификации концептуального дрейфа и уменьшить уровень ошибок (неправильно классифицировать существующий экземпляр класса как новый экземпляр класса) [8].

Новые стратегии обнаружения класса классифицируются как параметрические и непараметрические. Параметрический подход связывает нормальный диапазон данных с распределенным диапазоном для вычисления параметров распределения [9]. Если данные не соответствуют параметру распределения, они классифицируются как новый класс [10]. Непараметрические методы не основаны на распределении данных и, следовательно, не ограничены [11].

Методы исследования. Данная работа основана на непараметрическом подходе. Также большинство подходов, представленных в работах других авторов, могут обнаружить наличие только одного нового класса.

Предлагаемый автором подход. В данном случае, классификатор работает на ансамбле трех моделей. В предлагаемом подходе поток данных будет либо классифицирован в существующий класс, либо в новый класс. Пусть «L» представляет собой ансамбль моделей $\{M_1, M_2, M_3, \dots, M_n\}$.

В предлагаемом подходе используются следующие определения.

Определение 1. Существующий класс. Если модель M_i , принадлежащая ансамблю, обучается классу «С» и определяет ее, то класс «С» называется существующими классами. Другими словами, хотя бы одна модель, принадлежащая ансамблю M , должна обучаться классу С.

Определение 2. Новый класс. Если класс 'N' не известен ни одной из моделей M_i , принадлежащих ансамблю M , то «N» - новый класс. Ни одна модель ансамбля не была обучена новому классу.

Определение 3. Отклонения. Если x является тестовым экземпляром, и если он не соответствует спецификациям любого из классов С, то «х» является аномалией модели M_i . Аномалия не относится к какому-либо классу, определенному моделью.

На этапе обучения данные обучения делятся на равные кластеры. Для экспериментов и плавного управления размер каждого куска установлен на 2000 кортежей.

Разделение генерирует различное количество классов в каждом фрагменте [12]. Эти классы вычисляются путем применения метода К-медоидной кластеризации на каждом фрагменте. Эффективность метода К-медоидной кластеризации больше подходит для набора данных, содержащего аномалии [13].

На этапе обучения будет создана отдельная модель для каждого фрагмента данных, на которых проводится обучение [14]. Модель хранится как количество созданных кластеров и множеств (S_i), определяющих кластер. Правило классификации, за которым следует ансамбль: Если «х» - это экземпляр, подлежащий тестированию, он представляется каждой модели M_i в ансамбле, чтобы проверить, является ли это аномалией для модели M_i . Если он не является аномалией (Anom), он будет классифицирован по модели M_i в один из его классов, и если он будет обнаружен как аномалия всех трех моделей, тогда она будет считаться окончательной, то есть (FAnom).

На этапе обучения генерируются три модели, которые хранятся в виде количества кластеров и набора, определяющих кластеры [15]. Модели используются для обнаружения аномалий для тестовых данных. Данные испытания представляется каждой модели M_i для классификации.

Шаг 1. Чтобы классифицировать тестовый экземпляр данных, собираются кластеры, присутствующие в тестовом экземпляре данных [18]. Проверка выполняется, чтобы определить, присутствуют ли эти кластеры в наборе кластеров S_i , определяющих любой класс «С» модели.

Если кластеры тестового экземпляра присутствуют в множестве S_j класса 'C_j', то экземпляр классифицируется как принадлежащий классу 'C_j' модели 'M_i'. Если тестовый экземпляр данных не относится к какому-либо классу, определенному моделью «M_i», он объявляется как окончательный для этой модели «M_i».

Шаг 2. Этот шаг найдет окончательные аномалии ансамбля. Аномалия, обнаруженная на шаге 1 для каждой модели M_i , хранится в отдельном векторе «Anom_i». Каждый вектор «Anom_i» проверяется, чтобы узнать общий экземпляр данных, присутствующий во всех окончательных массивах. Если такой экземпляр найден, он объявляется как «FAnom», и все такие общие экземпляры хранятся в «FAnom_Vector». Процесс описан в алгоритме 1.

Алгоритм 1. FANOMVECTOR

Вход: Модели M_i и 'x'

Выход: FAnom_Vector (Вектор, содержащий аномалии в данных).

1. For each model 'M_i' in M
2. If $S(x) \in C_j M_i$ then
3. Append 'C_j' to 'x'
4. Else
5. Add 'x' to Anom_i
6. End if.

7. End for.

8. $FAnom_Vector = Intersection(Anom_1, Anom_2, \dots, Anom_i)$.

$FAnom_Vector$, сгенерированный в алгоритме 1, содержит три типа аномалий. Они вызваны концептуальным дрейфом, эволюцией концепции и шумом.

Понятие-дрейф для экземпляра $Anom_k$ из $FAnom_Vector$ можно обрабатывать с помощью набора S_k и сравнения с множеством разных кластеров, принадлежащих модели M_i . Операция пересечения, выполняемая на множестве S_k , и множество S_j разных классов C_j , а если результат более 50%, он объявлен как аномалий из-за «концепции-дрейфа». Экземпляр этих данных сохраняется в векторе «CD».

Для обработки концепции-дрифта найден кластер или класс, к которому первоначально принадлежит экземпляр « $Anom_k$ », и набор « s_j ».

Пусть « S_k » - это набор данных « $Anom_k$ », присутствующего в векторе «CD». Разностная операция выполняется на двух наборах S_j и S_k . Набор результатов будет представлять собой набор новых кластеров и сохранен в векторе DW вместе с классом, из которой происходит дрейф. Для класса C_j модели M_i и уникальных кластеров построена матрица CM [mxj] со всеми элементами, установленными в 0. Матрица сканируется и для каждого нового дрейфа W_m класса C_j . Для каждого появления нового дрейфа W_m класса C_j значение в позиции CM [m, j] увеличивается на 1.

Для каждого уникального кластера установлено общее пороговое значение для сравнения. Если значение в CM [m, j] больше заданного порогового значения, тогда W_m добавляется к набору S_j класса C_j . Происходит обработка концепции дрейфа и правильно сдвигает новые кластеры в доступных классах. Процесс объясняется в Алгоритме 2 ниже.

Алгоритм 2. CONCEPTDRIFT

Вход: FVector and Model 'Mi'

Выход: CD (данные с концептуальным дрейфом и обновленной моделью).

1. For each $Anom_k$ in $FAnom_Vector$
2. For each cluser C_j in model M_i
3. $Result \leftarrow Set-Intersection(S_k, S_j)$
4. If $(\neg(Anom(C_j)) \text{ and } (S(Result) \geq (50\% \text{ of } C_j)))$ then
5. $CD \leftarrow Anom_k$
6. Store information about C_j in JCount.
7. End if
8. End for.
9. End for.
10. For each instance 'x' in CD belonging to cluster C_j
11. $DW \leftarrow Set-Difference(X_i, S_j)$
12. End for.
13. $Unique_driftword \leftarrow Unique(DW)$.
14. For each ' W_m ' in $Unique_DW$
15. For each Class C_j in M_i
16. $CM[m, j] \leftarrow CM[m, j] + 1$.
17. End for
18. End for
19. If $(CM[m, j] > Threshold)$ then
20. Append word W_m ' S_j ' of Class ' C_j '
21. End if.
22. End algorithm.

Эволюция концепции определяется путем рассмотрения $FAnom_Vector$. Если экземпляр $Anom_k$, не удовлетворяющий критериям дрейфа концепции, он объявлен как эволюция концепции и сохраняется в векторе CE.

Экземпляр классифицируется как эволюция концепции, если более 50% кластеров экземпляра данных не удовлетворяют условию дрейфа концепции алгоритма 2.

Пороговое значение 50% фиксировано на основе проведенных экспериментов. В проведенных экспериментах отмечается, что порог 50% подходит для объявления экземпляра как эволюции концепции.

Эволюция концепции обрабатывается путем создания нового класса на основе результатов [16].

Процесс обработки концепции эволюции также связан с созданием нового класса [17]. Чтобы создать новый класс или новый класс, алгоритм кластеризации применяется к вектору CE. Число кластеров равно числу классов в векторе CE. Кластеры присоединяются к модели M_i ансамбля.

Алгоритм 3. CONEVOLUTION.

Вход: FVector and Model ' M_i '

Выход: CE (вектор, имеющий экземпляры concept_evolution)

1. For each Anom_k in FAnom_Vector.
2. For each cluster C_j in model M_i
3. Result ← Set Intersection (S_k, S_j)
4. If ((Anom (C_j)) and ($S(\text{Result}) < (50\% \text{ of } C_j)$)) then
5. CE ← Anom_k.
6. End if
7. End for
8. End for
9. Применим кластеризацию K-modoid на CE.
10. Получаем новые кластеры.
11. Добавляем новые кластеры в любые предыдущие модели M_i .
12. End algorithm

Обсуждение результатов. Разработанный алгоритм способен обрабатывать разнородные и разномасштабные данные. Каждый экземпляр, присутствующий в модели, принадлежит только одному классу. Экспериментальная работа была выполнена на четырех выборках потоковых данных по 2000 строк. После выполнения предварительной обработки в наборе данных были обнаружены многозначные характеристики данных.

Каждое событие имеет связанную с ним аномалию и рассматривается как другой класс [18]. Данные также содержат различные атрибуты, строки и столбцы, содержащие неполную информацию [19]. На этапе предварительной обработки удалены все такие строки и столбцы из набора данных. Набор данных содержит шесть нормальных классов и два новых класса.

В наборе данных, выбранном для экспериментов, ни один экземпляр, принадлежащий новому классу, не был объявлен как существующий экземпляр класса в наборе данных, и очень немногие экземпляры, принадлежащие к существующему классу, были объявлены как новый экземпляр класса [20]. Набор данных также содержит шум в виде экземпляров, принадлежащих к существующему классу, но остался неклассифицированным.

В табл. 1 показаны ошибки модели. Ошибка определяется как процент не классифицированных аномалий в данных. Уровень ложных срабатываний представляет собой процент ошибочно классифицированных случаев.

Из табл. 1 видно, что с каждым новым прогоном алгоритма процент ошибок снижается в среднем по частоте ошибок на 11,7, ошибок классификации на 0,4, уровень ложных срабатываний на 0,6%.

Таблица 1. Результаты ошибок при проверке подхода
Table 1. The results of errors in the verification approach

№ замера Measuring	Частота ошибок Error Frequency	Ошибочная классификация Erroneous classification	Уровень ложных срабатываний (%) The level of false positives (%)
1	14,65	1,2	0,4
2	2,55	0,6	1
3	2,1	0,8	-

Вывод. Представлен новый подход обработки разнородных и разномасштабных потоков данных. Представленный подход может обрабатывать бесконечную длину, концептуальную эволюцию и концептуальный дрейф. Он также может обнаруживать несколько новых классов, происходящих одновременно.

Разработанный подход основан на параметре сопоставления строк вместо расстояния для обработки четырех задач потоков данных. Уровень ложных срабатываний в разработанном алгоритме довольно низок и может считаться незначительным. Подход не классифицирует новый экземпляр класса как существующий класс, но может эффективно обрабатывать функциональную эволюцию. Все эксперименты проводились на данных фиксированного размера. В будущем планируется проверка подхода на динамических потоках данных.

Библиографический список:

1. A. El-Hoiydi, "Spatial TDMA and CSMA with preamble sampling for low power ad hoc wireless sensor networks", Proceedings of ISCC 2002, Seventh International Symposium on Computers and Communications, pp. 685 - 692, July 2002.
2. Bagutdinov R.A. The processing of heterogeneous data for multisensor systems of technical vision on the example of analysis of temperature and gas concentration / MSIT TPU. 2018. P. 25-26.
3. Багутдинов Р.А. Принцип разработки алгоритмического обеспечения системы технического зрения роботов / Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2017. Т. 9. №5. С. 66-71.
4. Bagutdinov R.A., Zaharova A.A. The task adaptation method for determining the optical flow problem of interactive objects recognition in real time / Journal of Physics: Conference Series. 2017. Т. 803. №1. С. 012014.
5. Барсегян А.А. Технологии анализа данных. Data Mining, Visual Mining, Text Mining, OLAP / Барсегян А.А., Куприянов М.С., Степаненко В.В., Холод И.И // СПб.: БХВ-Петербург, 2007.- 384 с.: ил.
6. Ganguly AR, Steinhäuser K Data mining for climate change and impacts. In Proceedings of IEEE international conference on data mining (ICDM) workshops. 2009; pp 385–394
7. Кадиев И.П., Кадиев П.А. Основы индексной структуризации nxn - комбинаторных конфигураций // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2018;45(1):139-146
8. Качаева Г.И., Попов А.Д., Рогозин Е.А. Показатели эффективности функционирования при разработке систем защиты информации от несанкционированного доступа в автоматизированных информационных системах // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2018;45(1):147-159.
9. Kuei-PingShih , Hung-ChangChen , Chien-MinChou , Bo-JunLiu "On target coverage in wireless heterogeneous sensor networks with multiple sensing units", Journal of Network and Computer Applications, vol. 32, pp. 866– 877, 2009.
10. Островский О.А. Дефиниционный анализ корреляционной зависимости информационной модели и криминалистической характеристики преступления в сфере компьютерной информации / Евразийский юридический журнал. №7 (110). 2017. С. 221-225.
11. Островский О.А. Принцип объектной декомпозиции в систематизации идентификационных кодов, характеризующих преступления в сфере компьютерной информации / Полицейская деятельность. № 3. 2017. С. 10-18.
12. Островский О.А. Криминалистический анализ, описывающий состояние детерминированного конечного автомата в модели наблюдателя при расследовании преступлений в сфере компьютерной информации / Евразийский юридический журнал. №3 (118). 2018. С. 294-296.
13. Островский О.А. Алгоритмы проведения осмотров цифровых носителей информации для предотвращения компьютерных преступлений / Военно-юридический журнал. № 11. 2017. С. 3-6.
14. Pietro Ciciriello, Luca Mottola, Gian Pietro Picco, "Efficient routing from multiple sources to multiple sinks in wireless sensor networks", in Proceedings of the 4th European Conference on Wireless Sensor Networks (EWSN'07), Lecture Notes in Computer Science, vol. 4373, pp. 34–50, January 2007.
15. Петренко Н.А., Багутдинов Р.А. Анализ мультисенсорных систем и сенсорного слияния данных / В сборнике: Молодёжь и современные информационные технологии. Сборник трудов XV Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных. Национальный исследовательский Томский политехнический университет. 2018. С. 73-74.
16. Ramaswamy S, Rastogi R, Shim K Efficient algorithms for mining outliers from large data sets. ACM SIGMOD. 2000; Rec 29(2):427–438
17. Hart JK, Martiez K Environmental sensor networks: a revolution in the earth system sciene? 2006; Earth Sci Rev 78:177–191
18. Юркова О.Н. Применение методов анализа данных для автоматизации формирования онтологии. // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2018;45(1):172-180.
19. W. Ye, J. Heidemann, and D. Estrin, "Medium Access Control with Coordinated Adaptive Sleeping for Wireless Sensor Networks", IEEE/ACM Trans. Networking, 2004; vol. 12, no. 3, pp. 493–506

20. Xie M, Hu J, Tian B Histogram-based online anomaly detection in hierarchical wireless sensor networks. In: Trust, Security and Privacy in Computing and Communications, 2012 IEEE 11th International Conference On. IEEE. 751–759

References:

1. A. El-Hoiydi, "Spatial TDMA and CSMA with preamble sampling for low power ad hoc wireless sensor networks", Proceedings of ISCC 2002, Seventh International Symposium on Computers and Communications, pp. 685 - 692, July 2002.
2. Bagutdinov R.A. The processing of heterogeneous data for multisensor systems of technical vision on the example of analysis of temperature and gas concentration / MSIT TPU. 2018. P. 25-26.
3. Bagutdinov R.A. Printsip razrabotki algoritmicheskogo obespecheniya sistemy tekhnicheskogo zre-niya robotov / Naukoyemkiye tekhnologii v kosmicheskikh issledovaniyakh Zemli. 2017. T. 9.№5. S. 66-71. [Bagutdinov R.A. The principle of developing algorithmic support of the robotic vision system / High technology in space exploration of the Earth.2017. T. 9.№5. P. 66-71. (In Russ.)]
4. Bagutdinov R.A., Zaharova A.A. The task adaptation method for determining the optical flow problem of interactive objects recognition in real time / Journal of Physics: Conference Series. 2017. T. 803. №1. C. 012014.
5. Barsegyan A.A. Tekhnologii analiza dannykh. Data Mining, Visual Mining, Text Mining, OLAP / Barsegyan A.A., Kupriyanov M.S., Stepanenko V.V., Kholod I.I // SPb.: BKHV-Peterburg, 2007.- 384 s.: il. [Barsegyan A.A. Data Analysis Technologies. Data Mining, Visual Mining, Text Mining, OLAP / Barsegyan AA, Kupriyanov MS, Stepanenko VV, Kholod II // St. Petersburg: BHV-Petersburg, 2007.- 384 p. (In Russ.)]
6. Ganguly AR, Steinhäuser K Data mining for climate change and impacts. In Proceedings of IEEE international conference on data mining (ICDM)workshops. 2009; pp 385–394
7. Kadiyev I.P., Kadiyev P.A. Osnovy indeksnoy strukturizatsii nxn - kombinatornykh konfiguratsiy. / Vestnik Daghestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki. 2018;45(1):139-146 [Kadiyev IP, Kadiyev PA Fundamentals of index structuring of nxn - combinatorial configurations. / Herald of Daghestan State Technical University. Technical science. 2018;45(1):139-146. (In Russ.)]
8. Kachayeva G.I., Popov A.D., Rogozin Ye.A. Pokazateli effektivnosti funktsionirovaniya pri razrabotke sistem zashchity informatsii ot nesanksionirovannogo dostupa v avtomatizirovannykh informatsionnykh sistemakh. / Vestnik Daghestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki. 2018;45(1):147-159. [Kachayeva G.I., Popov A.D., Rogozin E.A. Performance indicators for the development of information security systems against unauthorized access in automated information systems. / Herald of the Daghestan State Technical University. Technical science. 2018;45(1):147-159. (In Russ.)]
9. Kuei-Ping Shih, Hung-Chang Chen, Chien-MinChou, Bo-JunLiu "On target coverage in wireless heterogeneous sensor networks with multiple sensing units", Journal of Network and Computer Applications, vol. 32, pp. 866– 877, 2009.
10. Ostrovskiy O.A. Definitivnyy analiz korrelyatsionnoy zavisimosti informatsionnoy modeli i kriminalisticheskoy kharakteristiki prestupleniya v sfere komp'yuternoy informatsii / Yevraziyskiy yuridicheskiy zhurnal. №7 (110). 2017. S. 221-225. [Ostrovsky OA A definitive analysis of the correlation dependence of the information model and the forensic characteristics of the crime in the sphere of computer information / Eurasian Juridical Journal. №7 (110). 2017. P. 221-225. (In Russ.)]
11. Ostrovskiy O.A. Printsip ob'yektnoy dekompozitsii v sistematizatsii identifikatsionnykh kodov, kharakterizuyushchikh prestupleniya v sfere komp'yuternoy informatsii / Politseyskaya deyatel'nost'. № 3. 2017. S. 10-18. [Ostrovsky OA The principle of object decomposition in the systematization of identification codes characterizing crimes in the sphere of computer information / Police activity. № 3. 2017. P. 10-18. (In Russ.)]
12. Ostrovskiy O.A. Kriminalisticheskoy analiz, opisuyushchiy sostoyaniye determinirovannogo ko-nechnogo avtomata v modeli nablyudatelya pri rassledovanii prestupleniy v sfere komp'yuternoy informatsii / Yevraziyskiy yuridicheskiy zhurnal. №3 (118). 2018. S. 294-296. [Ostrovsky OA Criminalistic analysis describing the state of a deterministic finite automaton in the observer model in the investigation of crimes in the sphere of computer information / Eurasian Juridical Journal. №3 (118). 2018. C. 294-296. (In Russ.)]
13. Ostrovskiy O.A. Algoritmy provedeniya osmotrov tsifrovyykh nositeley informatsii dlya predotvrashcheniya komp'yuternykh prestupleniy / Voenno-yuridicheskiy zhurnal. № 11. 2017. S. 3-6. [Ostrovsky OA Algorithms for carrying out examinations of digital media for preventing computer crimes / Military-legal journal. № 11. 2017. pp. 3-6. (In Russ.)]
14. Pietro Ciciriello, Luca Mottola, Gian Pietro Picco, "Efficient routing from multiple sources to multiple sinks in wireless sensor networks", in Proceedings of the 4th European Conference on Wireless Sensor Networks (EWSN'07), Lecture Notes in Computer Science, vol. 4373, pp. 34–50, January 2007.
15. Petrenko N.A., Bagutdinov R.A. Analiz mul'tisensornykh sistem i sensornogo sliyaniya dannykh / V sbornike: Molodozh' i sovremennyye informatsionnyye tekhnologii. Sbornik trudov XV Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchonykh. Natsional'nyy issledovatel'skiy Tomskiy politekhnicheskii universitet. 2018. S. 73-74. [Petrenko NA, Bagutdinov RA Analysis of multi-sensory systems and sensory data merging / In the collection: Youth and modern information technology. Proceedings of the XV International Scientific and Practical Conference of students, graduate students and young scientists. National Research Tomsk Polytechnic University. 2018; P. 73-74. (In Russ.)]

16. Ramaswamy S, Rastogi R, Shim K Efficient algorithms for mining outliers from large data sets. ACM SIGMOD. 2000; Rec 29(2):427–438
17. Hart JK, Martiez K Environmental sensor networks: a revolution in the earth system sciene? 2006; Earth Sci Rev 78:177–191.
18. Yurkova O.N. Primeneniye metodov analiza dannykh dlya avtomatizatsii formirovaniya ontologii. / Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki. 2018;45(1):172-180.[Yurkova ON Application of data analysis methods to automate the formation of ontology. / Herald of the Dagestan State Technical University. Technical science. 2018;45(1):172-180. (In Russ.)]
19. W. Ye, J. Heidemann, and D. Estrin, “Medium Access Control with Coordinated Adaptive Sleeping for Wireless Sensor Networks”, IEEE/ACM Trans. Networking, 2004;vol. 12, no. 3, pp. 493–506.
20. Xie M, Hu J, Tian B Histogram-based online anomaly detection in hierarchical wireless sensor networks. In: Trust, Security and Privacy in Computing and Communications, 2012 IEEE 11th International Conference On. IEEE. 751–759

Сведения об авторе:

Багутдинов Равиль Анатольевич – ассистент, отделение автоматизации и робототехники Инженерной школы информационных технологий и робототехники.

Information about the author.

Ravil A. Bagutdinov– Assistant, Department of Automation and Robotics, School of Information Technology and Robotics.

Конфликт интересов.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 28.06.2018.

Принята в печать 29.08.2018.

Conflict of interest.

The author declare no conflict of interest.

Received 28.06.2018.

Accepted for publication 29.08.2018.

Для цитирования: Величко М.А., Гладких Ю.П., Сатлер О.Н. Калибровка ультразвукового расходомера по сети Wi-Fi с помощью Web-браузера. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2018;45 (3):94-102. DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-3-94-102

For citation: Velichko M. A., Gladkikh Yu.P., Satler O.N. Calibration of ultrasonic flowmeter for Wi-Fi network with the help of Web browser. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2018; 45(3):94-102. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-3-94-102

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 004.8

DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-3-94-102

КАЛИБРОВКА УЛЬТРАЗВУКОВОГО РАСХОДОМЕРА ПО СЕТИ WI-FI С ПОМОЩЬЮ WEB-БРАУЗЕРА

Величко М.А.¹, Гладких Ю.П.², Сатлер О.Н.³

¹⁻³Белгородский государственный национальный исследовательский университет,

¹⁻³308007, Белгородская область, г. Белгород, ул. Студенческая, 14, Россия,

¹e-mail: maxvel@inbox.ru, ²e-mail: Gladkikh@bsu.edu.ru, ³e-mail: Satler@bsu.edu.ru

Резюме. Цель. Цель работы заключалась в изменении способа передачи сигнала, содержащего метрологическую информацию, от промышленного импульсного ультразвукового расходомера газа на вычислительное устройство (ВУ). Планировалось расширить спектр устройств, выступающих в качестве вычислителей расхода газа. Планировалась разработка аппаратно-программного комплекса (АПК) для проведения автоматической калибровки/поверки ультразвуковых расходомеров. Указанный АПК должен был одинаково хорошо работать в различных операционных системах. Обмен информацией между ВУ и расходомером должен был осуществляться по беспроводной связи. **Метод.** В качестве протокола беспроводной связи был использован протокол Wi-Fi. Микроконтроллером для обеспечения функционала Wi-Fi был выбран энергоэффективный контроллер ESP8266. Плата ESP8266 выступала в роли точки доступа Wi-Fi сети, к которой для обмена данными подключалось ВУ. Микроконтроллер ESP8266 также служил HTTP сервером. Обмен метрологической и прочей информацией осуществлялся методом GET-запросов. Учитывая необходимость проведения непрерывных измерений расхода и одновременного общения пользователя с расходомером, запросы серверу передавались с помощью технологии AJAX. Программная часть АПК состояла из 3 программ: программы, осуществляющей измерение расхода и передающей информацию далее в микроконтроллер ESP8266, серверной программы, записанной в ESP8266, обеспечивающей ответ на запросы пользователей ВУ, и клиентской программы, установленной на ВУ. В статье рассмотрены ключевые моменты работы АПК. **Результат.** В результате выполнения данной работы был переработан АПК для проведения калибровки/поверки ультразвуковых расходомеров газа. Впервые этот процесс для промышленных расходомеров был реализован с помощью Wi-Fi контроллера ESP8266 в качестве точки доступа. В качестве ВУ стало возможно использовать любой стационарный или портативный компьютер или мобильное устройство с современным браузером. **Вывод.** Предложенный в работе метод существенно упростил обмен данными между вычислительным устройством и расходомером, удешевил процесс создания ПО благодаря единому для различных операционных систем подходу.

Ключевые слова: ультразвуковой расходомер, HTTP, UART, Wi-Fi, микроконтроллер, ESP8266, Arduino

TECHNICAL SCIENCE
COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT

CALIBRATION OF ULTRASONIC FLOWMETER FOR WI-FI NETWORK
WITH THE HELP OF WEB BROWSER

Maxim A. Velichko¹, Yulia P. Gladkikh², Olga N. Satler³

¹⁻³Belgorod State National Research University,

¹⁻³14 Student Str., Belgorod region, Belgorod 3308007, Russia,

¹e-mail: maxvel@inbox.ru, ²e-mail: Gladkikh@bsu.edu.ru, ³e-mail: Satler@bsu.edu.ru

Abstract. Objectives The purpose of the work was to change the method of signal transmission containing metrological information from industrial time-pulse ultrasonic gas flow meter to a computing device (CD). It was planned to expand the range of devices serving as gas flow calculators. A hardware-software complex (HSC) for automatic calibration / verification of ultrasonic flowmeters was to be developed. This HSC should work equally well on different operating systems. The information exchange between the CD and the flowmeter was to be carried out wirelessly. **Method.** The Wi-Fi Protocol was used as a wireless Protocol. The energy-efficient ESP8266 controller was chosen as microcontroller to provide the functionality of Wi-Fi. The ESP8266 board acted as a Wi-Fi access point on the network to which CD was connected for data exchange. The ESP8266 microcontroller also served as a HTTP server. Exchange of metrological and other information was carried out by GET-requests. Given the need for continuous flow measurements and simultaneous communication between the user and the flow meter, requests to the server were transmitted using AJAX technology. The software part of the APK consisted of 3 programs: a program that measured the flow and transmitted the information further to the ESP8266 microcontroller, a server program recorded in ESP8266, providing a response to the requests of CD users, and the client program installed on the CD. The article discusses the key points of the HSC. **Result.** As a result of this work, the HSC was processed for calibration/verification of ultrasonic gas flow meters. For the first time this process for industrial flow meters was implemented using the ESP8266Wi-Fi controller as an access point. As a WU, it became possible to use any desktop or laptop computer or mobile device with a modern browser. **Conclusion.** The method proposed in the paper significantly simplified the data exchange between the VU and the flowmeter, reduced the cost of software development due to the common approach for different operating systems.

Keywords: ultrasonic flowmeter, HTTP, UART, wifi, MSU, ESP8266, Arduino

Введение. Освоение ультразвуковых расходомеров газа активно ведется в течение последнего десятилетия [9]. Среди ультразвуковых методов измерения объемного расхода обычно выделяют три основных: доплеровский, время-импульсный и корреляционный методы. Выбор конкретного метода зависит от типа измеряемой среды.

Для измерения расхода многофазных (гетерогенных) сред лучше всего подходит доплеровский метод измерения.

На самом деле, эта задача технически сложна и решена только в некоторых случаях. В основе доплеровского метода лежит изменение частоты при отражении от движущихся неоднородностей измеряемой среды.

Постановка задачи. Для измерения расхода однофазных (гомогенных) сред лучше всего подходит время-импульсный метод измерения. Этот принцип основан на послышке в акустический канал расходомера ультразвуковых сигналов по потоку и против него. Скорость потока определяется по разности времени прохождения сигналов. Данный метод обладает высокой точностью измерения и возможностью обеспечения высокого быстродействия расходомеров (время «реакции» на изменения расхода).

Корреляционный метод измерения основан на принципе определения времени перемещения неоднородностей потока между двумя измерительными сечениями трубопровода. Время, которое

проходит между появлением сигналов с приблизительно одинаковой модуляцией в различных измерительных сечениях, соответствует скорости жидкости.

Преимущества этого метода измерений следующие: обеспечение низкой зависимости качества измерений от физико-химических свойств жидкости, состояния трубопровода, распределения скоростей по сечению потока и от точности монтажа первичных преобразователей на трубопроводе.

Важнейшим функциональным узлом ультразвуковых расходомеров являются излучатели-приемники (преобразователи) ультразвуковых волн, во многом определяющие эксплуатационные возможности и технический уровень приборов.

Наиболее часто излучатели-приемники выполняются на основе пьезокерамических элементов, причем конструкция и технические характеристики непосредственно пьезоэлектрических преобразователей в документации отечественных и зарубежных производителей, как правило, не приводятся.

Методы исследования. В представленной работе мы использовали промышленный времяимпульсный ультразвуковой расходомер газа, принцип действия которого заключается в измерении времени прохождения ультразвуковых (УЗ) импульсов по направлению потока газа в трубопроводе и против него [4].

Возбуждение импульсов производилось пьезоэлектрическими преобразователями [9], которые были установлены в корпусе расходомера [6-8]. Электронный блок осуществлял управление ультразвуковыми приемопередатчиками, прием, обработку, преобразование и передачу в вычислительное устройство (ВУ) сигналов, содержащих, в том числе, информацию о времени распространения УЗ импульсов [10-12], необходимую для вычисления объемного расхода газа в рабочих условиях:

$$v = \frac{L \cdot (t_2 - t_1)}{2 \cdot t_1 \cdot t_2 \cdot \cos \alpha}, \quad (1)$$

где

v – скорость потока в трубопроводе,

L – расстояние между приемопередатчиками,

α – угол между осью установки датчиков и осью трубопровода,

t_1 и t_2 – времена распространения УЗ импульсов по потоку и против

Передача сигналов в ВУ осуществлялась по интерфейсу RS-232 (стандарт физического уровня для асинхронного протокола UART).

В качестве вычислительного устройства ранее использовался персональный компьютер (ПК) под управлением операционной системы (ОС) Windows. Это имело ряд неудобств, связанных с организацией проводной связи и использованием USB-COM преобразователей, для работы которых необходимо устанавливать драйверы, отличающиеся для каждой версии ОС.

В нашу задачу входило упрощение процесса подключения расходомера к ВУ и расширение спектра ВУ для обработки и сохранения метрологических данных [3, 5]. При этом в качестве логического интерфейса передачи информации мы должны были оставить протокол UART.

Обсуждение результатов. Мы установили в электронный блок расходомера дополнительный модуль ESP8266 [1,2], разработанный китайской компанией Ai-thinker и построенный на базе процессора с одноименным ядром. Ядро ESP8266 интегрировано в Tensilica L106 – 32-битный микроконтроллер с ультранизким энергопотреблением. Модуль ESP8266 работает с тактовыми частотами 80 и 160 МГц, поддерживает операционную систему реального времени (RTOS), встроенный Wi-Fi функционал, имеет микрополосковую антенну на плате.

Модуль поддерживает стандарт IEEE802.11, полный стек TCP/IP протоколов. Модуль можно использовать либо в качестве дополнения для подключения какого-либо устройства к сети, либо в качестве отдельного сетевого контроллера.

В нашей задаче ESP8266 выступал в качестве точки доступа, и организованная им Wi-Fi сеть [13, 14] была видна при стандартном поиске сетей на ПК или мобильных устройствах. Информация о времени распространения УЗ импульсов передавалась в ESP8266 по асинхронному последовательному интерфейсу. ESP8266 обеспечивал предварительную обработку этой информации и дальнейшую ее передачу по сети Wi-Fi.

Модуль служил Web-сервером [15]: принимал HTTP-запросы от клиентов и выдавал им HTTP-ответы, содержащие, в том числе, необходимые для калибровки расходомера метрологические данные.

Встроенная в ESP8266 флэш-память позволила записать в него HTML/CSS страницы с программой проведения калибровки и функции предварительной обработки в виде скриптов JavaScript, текстовые формы отчета, JSON-файлы и прочие данные, которые передавались вместе с HTTP-ответами Web-клиентам. Для обмена сообщениями использовался метод GET.

Для программирования модуля ESP8266 мы выбрали среду разработки Arduino IDE, загрузив дополнительные файлы для работы с Wi-Fi модулем.

Arduino и Arduino-совместимые платы спроектированы таким образом, чтобы их можно было при необходимости расширять, добавляя в устройство новые компоненты. Эти платы расширений подключаются к Arduino посредством установленных на них штыревых разъёмов.

Существует ряд плат с унифицированным конструктивом, допускающим конструктивно жесткое соединение процессорной платы и плат расширения в стопку через штыревые линейки. Кроме того, выпускаются платы уменьшенных габаритов (например, Nano, Lilypad) и специальных конструктивов для задач робототехники.

Независимыми производителями также выпускается большая гамма всевозможных датчиков и исполнительных устройств, в той или иной степени совместимых с базовым конструктивом Arduino. ESP8266 – одна из таких плат.

Микроконтроллеры для Arduino отличаются наличием предварительно прошитого в них загрузчика. С помощью этого загрузчика программа загружается в микроконтроллер без использования традиционных отдельных аппаратных программаторов. Загрузчик соединяется с компьютером через интерфейс USB (если он есть на плате) или с помощью отдельного переходника UART-USB. Поддержка загрузчика встроена в Arduino IDE и выполняется в один щелчок мыши.

На случай затирания загрузчика или покупки микроконтроллера без загрузчика разработчики предоставляют возможность прошить загрузчик в микроконтроллер самостоятельно. Для этого в Arduino IDE встроена поддержка нескольких популярных дешевых программаторов, а большинство плат Arduino имеет штыревой разъем для внутрисхемного программирования.

В концепцию Arduino не входит корпусной или монтажный конструктив. Разработчик выбирает метод установки и механической защиты плат самостоятельно. Сторонними производителями выпускаются наборы робототехнической электромеханики, ориентированной на работу совместно с платами Arduino. Сторонние разработчики портировали в Arduino поддержку Wi-Fi микроконтроллера ESP8266. Теперь компилировать и загружать прошивку для ESP8266 со своими скетчами и поддержкой Wi-Fi можно прямо из Arduino IDE, получая одноплатную схему с поддержкой сети Wi-Fi.

Язык программирования Arduino является стандартным C++ (используется компилятор AVR-GCC) с некоторыми особенностями. Программы, написанные на Arduino, называются наброски (или иногда скетчи — калька от англ. sketch) и сохраняются в файлах с расширением .ino. Эти файлы перед компиляцией обрабатываются препроцессором Ардуино. Также существует возможность создавать и подключать к проекту стандартные файлы C++.

Обязательную в C++ функцию main () препроцессор Arduino создает сам, вставляя туда необходимые «черновые» действия. В текст своей программы (скетча) не обязательно вставлять заголовочные файлы используемых стандартных библиотек. Эти заголовочные файлы добавляет препроцессор Arduino в соответствии с конфигурацией проекта.

Менеджер проекта Arduino IDE имеет нестандартный механизм добавления библиотек. Библиотеки в виде исходных текстов на стандартном C++ добавляются в специальную папку в рабочем каталоге IDE. При этом название библиотеки добавляется в список библиотек в меню IDE. Программист отмечает нужные библиотеки и они вносятся в список компиляции.

Для тестирования работы клиент-серверного приложения мы использовали объект Serial, который работал точно также, как и с платами Arduino. Помимо аппаратного FIFO (по 128 байт для приема и передачи) был определен и программный буфер размером по 256 байт для приема и передачи данных. Прием и передача данных происходила по прерываниям, прозрачно для

скетча. Функции записи и чтения блокировали выполнение скетча, только когда аппаратный FIFO и программный буфер переполнялись.

Serial использовал аппаратный UART0, работающий на входе-выходе GPIO1(TX – передатчик) и GPIO3(RX – приемник). Эти пины были переназначены на GPIO15 (TX) и GPIO13 (RX) вызовом функции Serial.swap(); после Serial.begin();. Повторный вызов Serial.swap(); возвращал все на свои места. Serial1 использовал аппаратный UART1, работающий только на передачу (UART1 TX это GPIO2). Для включения Serial1 использовали Serial1.begin();. По умолчанию, отладочная информация библиотек WiFi выключалась, при вызове функции Serial.begin(). Для включения отладочной информации на UART0 использовался Serial.setDebugOutput(true); Для перенаправления вывода отладочной информации на UART1 применялась команда Serial1.setDebugOutput(true);.

И Serial и Serial1 поддерживали 5, 6, 7, 8 бит данных, odd (O), even (E), и no (N) режимы четности, и 1 или 2 стоп бита. Для выбора нужного режима вызывался Serial.begin(baudrate, SERIAL_8N1); или Serial.begin(baudrate, SERIAL_6E2); и т.д.

Для разработки программы калибровки расходомера (в нашем случае: процесса подстройки показаний объемного расхода газа в рабочих условиях на расходомере до достижения согласования с эталонной величиной расхода на эталонных критических соплах с учётом оговоренной точности) были подключены файлы:

- FS.h для работы с файловой системой SPIFFS модуля и распознавания таких файлов как .htm, .html, .js, .txt, .json, .css и пр.,
- ESP8266WiFi.h для поддержания режимов работы в сети WiFi, в частности режима точки доступа,
- ESP8266WebServer.h для обработки запросов Web-клиентов и отправки ответов,
- ESP8266SSDP.h для включения режима обнаружения Simple Service Discovery Protocol.

Во флэш-память ESP8266 были записаны необходимые html-страницы интерфейса калибровки расходомера (рис. 1).

При внесении изменений в каждое поле формы или при нажатии кнопки на html-странице в ESP8266 отправлялся запрос с помощью технологии AJAX, заключающейся в «фоновом» обмене данными браузера с веб-сервером. AJAX — это аббревиатура, которая означает Asynchronous Javascript and XML. При использовании AJAX нет необходимости обновлять каждый раз всю страницу, так как обновляется только ее конкретная часть. Это существенно повышает скорость работы Web-приложения, а в случае постоянного обмена данными с приборами без AJAX обойтись достаточно трудно. Обмениваться данными с сервером можно двумя способами.

Первый способ — это GET-запрос. В этом запросе обращение идет к документу на сервере, аргументы ему передаются через сам URL. Не рекомендуется делать GET-запросы к серверу с большими объемами данных. Для этого существует POST-запрос.

Рис.1. Пример Web-страницы для проведения калибровки
Fig.1. Sample Calibration Web-Page

Клиент часть, написанная на Javascript, должна обеспечивать необходимую функциональность для безопасного обмена с сервером и предоставлять методы для обмена данными любым из вышеперечисленных способов. Серверная часть должна обрабатывать входные данные, и на основе их генерировать новую информацию, и отдавать ее обратно клиенту. Например, для запроса информации с сервера можно использовать обычный GET-запрос с передачей нескольких и небольших по размеру параметров, а для обновления информации, или добавления новой информации потребуется использовать уже POST-запрос, так как он позволяет передавать большие объемы данных.

AJAX использует асинхронную передачу данных. Это значит, что пока идёт передача данных, пользователь может совершать другие, необходимые ему действия. Индикация во время обмена данными позволяет понять, что не произошло зависание приложения. Ответ от сервера может быть не только XML, как следует из названия технологии. Помимо XML, можно получить ответ в виде обычного текста, или же JSON (Javascript Object Notation). Если ответ был получен простым текстом, то его можно сразу вывести в контейнер на странице. При получении ответа в виде XML, обычно происходит обработка полученного XML документа на стороне клиента и преобразование данных к (X)HTML. При получении ответа в формате JSON достаточно выполнить лишь принятый код для получения полноценного объекта Javascript. В разных браузерах данный объект обладает разными свойствами, но в целом он совпадает. Мы для этой цели использовали объект XMLHttpRequest, позволявший из JavaScript делать HTTP-запросы к серверу (ESP8266 модулю) без перезагрузки страницы. Пример JavaScript функции запроса приведен ниже:

```
function loadIndexData()
{
    var xhr = new XMLHttpRequest();
    xhr.open('GET', 'starting.json', true);
    xhr.send();
    xhr.onreadystatechange = function()
    {
        if (xhr.status == 200)
        {
            var indexData = JSON.parse(xhr.responseText);
            console.log(indexData.verificatorName + ", " + indexData.verificationObject);
        }
    };
}
```

Для «перехвата» запросов на сервере на каждой итерации работы WiFi-модуля вызывалась функция-метод веб-сервера *handleClient()*. HTTP-метод вида *on("/starting.json", handleStartingJson)* вызывался после запроса браузера на получение информации о значении различных переменных. Информация для этой цели предварительно записывалась в файл *starting.json*:

```
void handleStartingJson()
{
    String json = "{}";
    json += "\"verificatorName\":";
    json += "\"";
    json += verificatorName;
    json += "\"";
    json += ",";
    json += "\"verificationObject\":";
    json += "\"";
    json += verificationObject;
    json += "\"";
}
```

```
    json += "}";  
    HTTP.send(200, "text/json", json);  
}
```

Вывод. После внесенных нами аппаратных и программных изменений в качестве конечного обработчика метрологических данных может служить любой персональный или мобильный компьютер, планшет или смартфон. Практически единственным требованием к ВУ стало наличие современного браузера, поддерживающего основные возможности протокола HTML5. При этом устройство может находиться под управлением Windows, Mac OS, Android, iOS, Linux и прочих операционных систем. Необходимость в установке дополнительных драйверов также отпала.

Библиографический список:

1. Величко М.А., Гладких Ю.П., Сатлер О.Н., Нигматуллин М.Ю. Разработка программно-технического комплекса для создания и последующего мониторинга карты тепловых потерь зданий и сооружений с помощью беспилотных летательных аппаратов // Успехи современной науки. – 2017. – том 4, №1. – С. 96-98.
2. Величко М.А., Гладких Ю.П., Сатлер О.Н. Использование дрона в качестве точки доступа Wi-Fi в процессе создания энергетической карты местности // Успехи современной науки. 2017. Т. 1. № 5. С. 78-80.
3. Гершман Э.М., Пругло С.Д., Фафурин А.В., Явкин В.Б. Оценка погрешности измерения расхода ультразвуковым расходомером в потоке с неоднородным распределением скорости звука // Труды Академэнерго. 2015. № 3. С. 7-16.
4. Кузнецов Е. Ультразвуковые расходомеры // Сборник: Шаг в науку материалы VI региональной научно-образовательной конференции. 2016. С. 70-71.
5. Фафурин В.А., Яценко И.А., Фефелов В.В., Сабирзянов А.Н. Расчет метрологических характеристик ультразвуковых расходомеров // Законодательная и прикладная метрология. 2010. № 3 (106). С. 45-47.
6. Тихонов А.И., Краев В.М. Инвестиционный потенциал рынка беспилотных летательных аппаратов // Современный ученый. 2017. Т. 1. № 1. С. 42-46.
7. Абукова Л.А., Дмитриевский А.Н., Еремин Н.А. Цифровая модернизация нефтегазового комплекса России // Нефтяное хозяйство. 2017. № 10. С. 54-58.
8. Воронин К.С., Авад М.А. Усовершенствование систем измерения количества нефти и нефтепродуктов путем переоснащения узлов учета ультразвуковыми расходомерами // В сборнике: Проблемы функционирования систем транспорта. Материалы Международной научно-практической конференции. 2010. С. 69-72.
9. Богущ М.В., Кузьмичева Е.В., Пикалев Э.Ж., Богущ А.М. Пьезоэлектрические акустические преобразователи и ультразвуковые расходомеры на их основе // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2010. № 2. С. 21-24.
10. Гришанова И.А., Покрас И.С. Усовершенствование ультразвуковых расходомеров // Сантехника, отопление, кондиционирование. 2010. № 10 (106). С. 54-57.
11. Sun J., Lin W., Zhang C., Shen Z., Zhang H. Time Delay Estimation In The Ultrasonic Flowmeter in The Oil Well // В сборнике: Physics Procedia International Congress on Ultrasonics, ICU 2009. Сер. "International Congress on Ultrasonics, ICU 2009" Santiago, 2010. pp. 781-788.
12. Luca A., Marchiano R., Chassaing J.-C. Numeric Simulation Of Transit-Time Ultrasonic Flowmeters By A Direct Approach // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. 2016. Т. 63. № 6. pp. 886-897.
13. Chang C.-Y., Kuo C.-H., Chen J.-C., Wang T.-C. Design And Implementation of An IoT Access Point For Smart Home // Applied Sciences (Switzerland). 2015. Т. 5. № 4. pp. 1882-1903.
14. Verton D. New Risk For Wireless Access Points // Computerworld. 2002. Т. 36. № 34. pp. 1-2.
15. Rhee Y.Ju., Kim J.B., Kim G.Ho., Yi S.H., Kim T.Yu. Efficient Connection Management For Web Applications // Lecture Notes in Computer Science. 2002. Т. 2468. pp. 54-63.
16. Рева И.Л., Богданов А.А., Малахова Е.А. Применение точек доступа Wi-Fi для регистрации движения на объекте // Новосибирский государственный технический университет. 2017. №3(68). С. 104-125.
17. Bankov D., Khorov E., Lyakhov A., Stepanova E. Fast Centralized Authentication in WI-FI Halow Networks // 2017 Ieee International Conference on Communications, ICC. 2017. С.1167-1173.
18. Raschella A., Bouhafs F., Mackay M., Shi Q., Seyedebrahimi M. Quality Of Service Oriented Access Point Selection Framework For Large WI-FI Networks // IEEE Transactions on Network and Service Management. 2017. Т. 14. № 2. С. 441-455.
19. Mikhalevskiy D., Naugolnykh E., Melnykh V. Traffic Transfer In WI-FI Networks While Switching Between Access Points // Modern scientific research and their practical application. 2014. Т. 21410. С. 161-165.
20. Глушнев В.Д., Панов М.М. Тенденции совершенствования современных ультразвуковых расходомеров // Вестник Московского энергетического института. 2018. № 3. С. 94-100.

References:

1. Velichko M.A., Gladkikh YU.P., Satler O.N., Nigmatullin M.YU. Razrabotka programmno-tekhnicheskogo kompleksa dlya sozdaniya i posleduyushchego monitoringa karty teplovykh poter' zdaniy i so-oruzyeniy s pomoshch'yu bespilotnykh letatel'nykh apparatov // Uspekhi sovremennoy nauki. – 2017. – tom 4, №1. - С. 96-98. [Velichko M. A., Gladkikh, Yu. P., Sutler O. N., Nigmatullin, M. Y. Development of software and hardware complex for creation and subsequent monitoring card of thermal losses of buildings and structures with unmanned aerial vehicles // Advances of modern science. – 2017. – vol. 4, No. 1. - P. 96-98. (In Russ)]
2. Velichko M.A., Gladkikh YU.P., Satler O.N. Ispol'zovaniye drona v kachestve tochki dostupa Wi-Fi v protsesse sozdaniya energeticheskoy karty mestnosti // Uspekhi sovremennoy nauki. 2017. T. 1. № 5. S. 78-80. [Velichko M. A., Gladkikh, Yu. P., Sutler O. N. The use of drone as a point of access Wi-Fi in the process of creating energy maps // Advances of modern science. 2017. Vol. 1. No. 5. P. 78-80. (In Russ)]
3. Gershman E.M., Pruglo S.D., Fafurin A.V., Yavkin V.B. Otsenka pogreshnosti izmereniya raskhoda ul'trazvukovym raskhodomerom v potoke s neodnorodnym raspredeleniyem skorosti zvuka // Trudy Akadem-energo. 2015. № 3. S. 7-16. [Gershman, E. M., D. S. Pruglo, Fafurin V. A., V. B. Yavkin Estimation of error of flow measurement by ultrasonic flowmeter in the flow with inhomogeneous distribution of the speed of sound // transactions of academenergo. 2015. No. 3. Pp. 7-16. (In Russ)]
4. Kuznetsov Ye. Ul'trazvukovyye raskhodometry // Sbornik: Shag v nauku materialy VI regional'noy nauchno-obrazovatel'noy konferentsii. 2016. S. 70-71. [Kuznetsov E. Ultrasonic flowmeters // Collection: Step into science proceedings of the VI regional scientific-educational conference. 2016. P.70-71. (In Russ)]
5. Fafurin V.A., Yatsenko I.A., Fefelov V.V., Sabirzyanov A.N. Raschet metrologicheskikh kharakteristik ul'trazvukovykh raskhodomerov // Zakonodatel'naya i prikladnaya metrologiya. 2010. № 3 (106). S. 45-47. [Fafurin V. A., Yatsenko I. A., Fefelov V. V., Sabirzyanov A. N. The calculation of the metrological characteristics of the ultrasonic flowmeter // Legislative and applied Metrology. 2010. № 3 (106). P. 45-47.
6. Tikhonov A.I., Krayev V.M. Investitsionnyy potentsial rynka bespilotnykh letatel'nykh apparatov // Sovremennyy uchenyy. 2017. T. 1. № 1. S. 42-46. [Tikhonov A. I., Kraev V. M. the Investment potential of the market of unmanned aerial vehicles // Modern scientist. 2017. Vol. 1. No. 1. P. 42-46. (In Russ)]
7. Abukova L.A., Dmitriyevskiy A.N., Yeremin N.A. Tsifrovaya modernizatsiya neftegazovogo kompleksa Rossii // Neftyanoye khozyaystvo. 2017. № 10. S. 54-58. [Abukova L. A., Dmitriyevskiy A. N., Eremin, N.A. Digital modernization of oil and gas complex of Russia // Oil industry. 2017. No. 10. S. 54-58. (In Russ)]
8. Voronin K.S., Avad M.A. Uovershenstvovaniye sistem izmereniya kolichestva nefti i nefteproduktov putem pereosnashcheniya uzlov ucheta ul'trazvukovymi raskhodomerami // V sbornike: Problemy funktsionirovaniya sistem transporta. Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. 2010. S. 69-72. [Voronin K. S., Awad M. A. Improving the measurement of the amount of oil and oil products by retrofitting metering ultrasonic flow meters // In collection: problems of functioning of transport systems. Materials of International scientific-practical conference. 2010. PP. 69-72. (In Russ)]
9. Bogush M.V., Kuz'micheva Ye.V., Pikalev E.ZH., Bogush A.M. P'yezoelektricheskiye akusticheskiye preobrazovately i ul'trazvukovyye raskhodometry na ikh osnove // Avtomatizatsiya, telemekhanizatsiya i svyaz' v neftyanoy pro-myshlennosti. 2010. № 2. S. 21-24. [Bogush M. V., Kuzmicheva E. V., Pikulev E. F., Bogusz A. M. Piezoelectric acoustic transducers and ultrasonic flow meters based on them // automation, telemechanization and communication in oil industry. 2010. No. 2. S. 21-24. (In Russ)]
10. Grishanova I.A., Pokras I.S. Uovershenstvovaniye ul'trazvukovykh raskhodomerov // Santehnika, otople-niye, konditsionirovaniye. 2010. № 10 (106). S. 54-57. [Grishanova A. I., Pokras I. S. Improvement of ultrasonic flowmeters // Plumbing, heating, air conditioning. 2010. No. 10 (106). P. 54-57. (In Russ)]
11. Sun J., Lin W., Zhang C., Shen Z., Zhang H. Time Delay Estimation In The Ultrasonic Flowmeter in The Oil Well // In the book: Physics Procedia, International Congress on Ultrasonics, ICU 2009. Ser. "International Congress on Ultrasonics, ICU 2009" Santiago, 2010. P. 781-788.
12. Luca A., Marchiano R., Chassaing J.-C. Numeric Simulation Of Transit-Time Ultrasonic Flowmeters By A Direct Approach // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. 2016. T. 63. No. 6. pp. 886-897.
13. Chang C.-Y., Kuo C.-H., Chen J.-C., Wang T.-C. Design And Implementation of An IoT Access Point For Smart Home // Applied Sciences (Switzerland). 2015. Vol. 5. No. 4. pp. 1882-1903.
14. Verton D. New Risk For Wireless Access Points // Computerworld. 2002. Vol. 36. No. 34. S. 1-2.
15. Rhee Y. Ju., Kim J. B., Kim G. Ho., Yi S. H., Kim T. Yu. Efficient Connection Management For Web Applications // Lecture Notes in Computer Science. 2002. T. 2468. pp. 54-63.
16. Reva I.L., Bogdanov A.A., Malakhova Ye.A. Primeneniye tochek dostupa Wi-Fi dlya registratsii dvizheniya na ob'yekte // Novosibirskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiiy universitet. 2017. №3(68). S. 104-125. [Reva I. L., Bogdanov A. A., Malakhova E. A. application of Wi-Fi access points for traffic registration at the facility // Novosibirsk state technical University. 2017. №3 (68). pp. 104-125. (In Russ)]
17. Bankov D., Khorov E., Lyakhov A., Stepanova E. Fast Centralized Authentication in WI-FI Halow Networks // 2017 Ieee International Conference on Communications, ICC. 2017. pp. 1167-1173.

18. Raschella A., Bouhafs F., Mackay M., Shi Q., Seyedebrahimi M. Quality Of Service Oriented Access Point Selection Framework For Large WI-FI Networks // IEEE Transactions on Network and Service Management. 2017. T. 14. № 2. С. 441-455.
19. Mikhalevskiy D., Naugolnykh E., Melnykh V. Traffic Transfer In WI-FI Networks While Switching Between Access Points // Modern scientific research and their practical application. 2014. T. 21410. pp. 161-165.
20. Glushnev V. D., Panov M. M. trends of improvement of modern ultrasonic flowmeters // Bulletin of the Moscow power engineering Institute. 2018. No. 3. pp. 94-100.

Сведения об авторах:

Максим Андреевич Величко – кандидат физико-математических наук, доцент.

Гладких Юлия Петровна – кандидат физико-математических наук, доцент.

Сатлер Ольга Николаевна – кандидат технических наук, доцент.

Information about the authors.

Maxim A. Velichko – Cand. Sci. (Physical and Mathematical), Assoc.Prof.

Yulia P. Gladkikh – Cand. Sci. (Physical and Mathematical), Assoc.Prof.

Olga N. Satler – Cand. Sci. ((Technical), Assoc.Prof.

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 01.06.2018.

Принята в печать 29.08.2018.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 01.06.2018.

Accepted for publication 29.08.2018.

Для цитирования: Довгаль В.М., Хеин Мин Зо. Сравнительная характеристика программных комплексов для анализа и обработки речевых сигналов с использованием вейвлетов. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2018;45(3):103-113. DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-3-103-113

For citation: Dovgal V.M., Hein Min Zo. Comparative characteristics of software systems for analysis and processing of speech signals using wavelets. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2018; 45(3):103-113. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-3-103-113

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 681.3.067

DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-3-103-113

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ АНАЛИЗА И ОБРАБОТКИ РЕЧЕВЫХ СИГНАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЕЙВЛЕТОВ

Довгаль В.М.¹, Хеин Мин Зо²

¹⁻²Курский государственный университет,

¹⁻²305000, Курская область, г.Курск, ул. Радищева, 33, Россия,

¹e-mail: vmdovgal@yandex.ru, ²e-mail: heinminnzaw13@gmail.com

Резюме. Цель. Данная статья посвящена проблеме обработки и анализа речевых сигналов на основе ставшего одним из наиболее актуальных в последнее время метода вейвлет-преобразования. **Метод.** Растущая актуальность и несомненная практическая ценность стала причиной появления большого количества программных комплексов, позволяющих осуществлять обработку речевых сигналов на базе данного метода. Однако каждый из этих комплексов имеет существенные различия в интерфейсе, предоставляемых инструментах обработки, функциях, обладает рядом достоинств и недостатков. На данный момент написано большое количество пособий и рекомендаций по работе с конкретными программными комплексами, но эти материалы носят разрозненный и бессистемный характер. **Результат.** Предпринята попытка систематизации теоретического материала и описания сходств и различий, достоинств и недостатков трёх наиболее популярных программных комплексов: 1) Пакет расширения систем MATLAB 6.0/6.1/6.5 Wavelet Toolbox 2/2.1/2.2; 2) Программный комплекс Mathcad; 3) Wavelet Explorer системы Mathematica. **Вывод.** Данная статья будет полезна специалистам, занимающимся проблемой обработки речевых сигналов с использованием метода вейвлет-преобразования, так как содержит материал, имеющий практическую ценность, а также позволит в определенной мере облегчить работу специалиста, связанную с выбором оптимального для реализации конкретной задачи программного комплекса.

Ключевые слова: обработка речевых сигналов, алгоритмы обработки речи, теория вейвлет-преобразования, вейвлет-анализ речевых сигналов, программные комплексы для обработки речевых сигналов

TECHNICAL SCIENCE
COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT

COMPARATIVE CHARACTERISTICS OF SOFTWARE SYSTEMS FOR ANALYSIS
AND PROCESSING OF SPEECH SIGNALS USING WAVELETS

Victor M. Dovgal¹, Hein Min Zo²

^{1,2}Kursk State University,

^{1,2}33 Radishcheva Str., Kursk 305000, Russia,

¹e-mail: vmdovgal@yandex.ru, ²e-mail: heinminnzaw13@gmail.com

Abstract. Objectives This article is devoted to the problem of processing and analysis of speech signals on the basis of the wavelet transform method, which has become one of the most relevant in recent years. **Method.** The growing relevance and undoubted practical value became the reason for the emergence of a large number of software systems that allow the processing of speech signals on the basis of this method. However, each of these systems has significant differences in the interface provided by the processing tools, functions, has a number of advantages and disadvantages. At the moment, a large number of manuals and recommendations for specific software packages have been written, but these materials are fragmented and unsystematic. **Result.** This article attempts to systematize the theoretical material and describe the similarities and differences, advantages and disadvantages of the three most popular software systems: 1) MATLAB 6.0/6.1/6.5 Wavelet Toolbox 2/2.1/2.2; 2) Mathcad; 3) Wavelet Explorer of Mathematica. **Conclusion.** This article will be useful for specialists dealing with the problem of speech signal processing using the wavelet transform method, as it contains material that has practical value, and will allow to facilitate the work of a specialist related to the selection of the optimal for the implementation of a specific task of the software complex.

Keywords: speech signal processing, speech processing algorithms, wavelet transform theory, wavelet analysis of speech signals, software systems for speech signal processing

Введение. В последние годы стало очевидно, что традиционный аппарат представления произвольных функций и сигналов, в том числе речевых, в виде рядов Фурье (или фурье-представлений) оказывается малоэффективным для функций с локальными особенностями, в частности для импульсных и цифровых сигналов, получивших весьма широкое распространение. Это связано с тем, что базисная функция рядов Фурье представляет собой синусоиду, которая по своей природе является гладкой и строго периодической функцией. Как об этом давно говорили критики рядов Фурье, такая функция на практике (в условиях ограничения числа членов ряда или спектра разложения) принципиально не способна описывать произвольные сигналы и функции. Иными словами, ни один из известных методов представления сигналов и функций не мог считаться эффективным для представления импульсных, нестационарных сигналов.

Решением данной проблемы стало изобретение метода вейвлет-анализа. В первую очередь следует отметить, что вейвлеты по существу являются новыми математическими понятиями и объектами, в связи с этим они весьма перспективны в решении многих математических задач приближения (интерполяции, аппроксимации, регрессии и т. д.) функций и сигналов.

Постановка задачи. Вейвлет-обработка сигналов обеспечивает возможность весьма эффективного сжатия сигналов, в том числе и речевых, и их восстановления с малыми потерями информации, а также решение задач фильтрации сигналов. Таким образом, вейвлеты существенно пополняют набор традиционных средств обработки сигналов и изображений.

Методы исследования. Основные методы теории вейвлетов базируются на работах классиков математической науки: А.Н. Колмогорова, А. Лебега, А. Хаара, К. Шеннона. Значительный вклад в развитие теории вейвлет-преобразования в начале XX века внес А. Хаар, впервые наглядно показавший, что в приложении к практическим задачам вейвлеты во многом более удобны, нежели применявшиеся до этого преобразования Фурье.

Вейвлеты применялись на практике еще в 50-е годы прошлого века при фильтрации сигналов, но расцвет теории вейвлетов приходится на 80 – 90-е годы XX века. Именно в этот период были получены законченные теоретические результаты и разработаны эффективные методы их практического применения.

Конец XX века ознаменовался работами таких блестящих исследователей, как Гроссман, Гуппилауд и Морле, в 1982 г. сформулировавших основные идеи непрерывного вейвлет-преобразования. Нельзя не отметить вклад Ингрид Добеши, разработавшей в 1988 г. вейвлеты с компактным носителем. Ее монография «Десять лекций по вейвлетам» стала классической. Наибольшее внимание к данной теории было уделено в США.

До России информация о теории вейвлетов добралась с опозданием на 8 – 10 лет. В 1999 г. появились первые работы по теории вейвлетов на русском языке, в 2001 г. свет увидели переводы «Десяти лекций по вейвлетам» И. Добеши и «Введения в вейвлеты» Чарльза К. Чуи. Одним из первых русских ученых, заинтересовавшихся данной проблемой, стал С.Б. Стечкин. Он и его ученики стали работать над теорией вейвлетов, позже к ним присоединились математики из Петербурга и Новосибирска [1].

К основным достоинствам вейвлетов, ставших причиной их растущей популярности, как было отмечено выше, можно отнести их принципиальную возможность представлять нестационарные сигналы, например, состоящие из разных компонент, действующих в разные промежутки времени, модулированные сигналы и т.д. Такие сигналы в наше время находят куда более широкое применение, чем стационарные или квазистационарные (искусственно сводящиеся к стационарным) сигналы, а также процессы и системы, их порождающие. Как известно, ряды и преобразования Фурье в классическом виде принципиально непригодны для представления нестационарных сигналов, процессов и систем. Поэтому возможность их представления вейвлетами трудно переоценить.

В настоящее время существует огромное количество работ, посвященных теории вейвлетов, написанных учеными из самых разных стран мира. Появились инструментальные средства по вейвлетам в системах Matlab, Mathcad и Mathematica, что, безусловно, упрощает прикладные расчеты. Таким образом, можно говорить о растущей популярности теории вейвлет-преобразований, о чем свидетельствует большое количество работ, посвященной этой теме.

Обсуждение результатов. Рассмотрим 3 наиболее популярных и актуальных на данный момент программных комплексов, которые целесообразно использовать в процессе анализа и обработки речевых сигналов, компрессии, очистке от шума или реконструкции в частности:

- 1) Пакет расширения систем MATLAB 6.0/6.1/6.5 Wavelet Toolbox 2/2.1/2.2;
- 2) Программный комплекс Mathcad;
- 3) Wavelet Explorer системы Mathematica.

Однако, несмотря на то, что каждый из данных программных комплексов, обладает широким функционалом для работы с речевыми сигналами, можно говорить о том, что они всё же имеют отличительные черты, а также обладают видимыми отличиями в инструментарии и визуальном оформлении. Рассмотрим каждый из перечисленных комплексов более подробно, отметим его основные особенности.

Несмотря на то, что существует немало работ и практических пособий, иллюстрирующих принципы работы данных программных комплексов, однако ни в одной из работ на данный момент не изложена кратко и четко специфика каждого из комплексов, а также его основные отличия. Именно поэтому, на наш взгляд, было необходимо провести анализ имеющейся литературы, касающейся проблемы вейвлет-преобразования, структурировать имеющийся материал и кратко изложить в рамках одной статьи основные особенности каждого из программных комплексов, с тем чтобы исследователь, целью которого является обработка речевого сигнала методом вейвлет-преобразования, смог выбрать наиболее оптимальный программный комплекс, исходя из удобства его интерфейса, функциональности и простоты использования..

Пакет расширения систем MATLAB 6.0/6.1/6.5 Wavelet Toolbox 2/2.1/2.2 —одно из новейших и мощных инструментальных средств для изучения, создания и применения вейвлетов и

проведения вейвлет-преобразований. Пакет представляет пользователю обширные и одновременно уникальные возможности для работы с вейвлетами, причем как в командном режиме, так и с помощью специальных средств графического интерфейса пользователя (GUI) данного пакета.

По обилию типов вейвлетов и функций для обработки сигналов, а также по числу весьма поучительных и наглядных примеров в фирменном описании этот пакет является лучшим среди пакетов расширения для СКМ в этой области (пакеты расширения по вейвлетам есть и в новых реализациях СКМ Mathcad и Mathematica) [1].

Пакет Wavelet Toolbox предоставляет:

- инструментальные средства для вейвлет-анализа и синтеза сигналов и изображений;
- множество уже встроенных вейвлетов разного типа, в том числе пакетных;
- возможность задания своего вейвлета с заданными свойствами;
- средства обработки сигналов и изображений;
- средства для непрерывного и дискретного вейвлет-анализа;
- средства очистки сигналов от шума и специальной обработки;
- средства обработки и компрессии сигналов изображений;
- мощные средства визуализации вейвлетов и всех операций с ними.

Указанные средства предоставляются как на уровне функций, выполняемых из командной строки или программных модулей, так и на уровне хорошо проработанного и удобного графического интерфейса пользователя (GUI). Продемонстрируем на конкретном примере возможности данного программного комплекса.

Рис. 1. показывает возможности вейвлет-обработки сигнала с шумом с помощью средств программного комплекса Wavelet Toolbox. Для обработки используются одномерные дискретные вейвлеты (wavemenu ► File ► Wavelet 1-D) Сверху панели управления можно сменить тип вейвлета и с помощью кнопки анализа Analyze выполнить разложение для выбранного типа вейвлета.

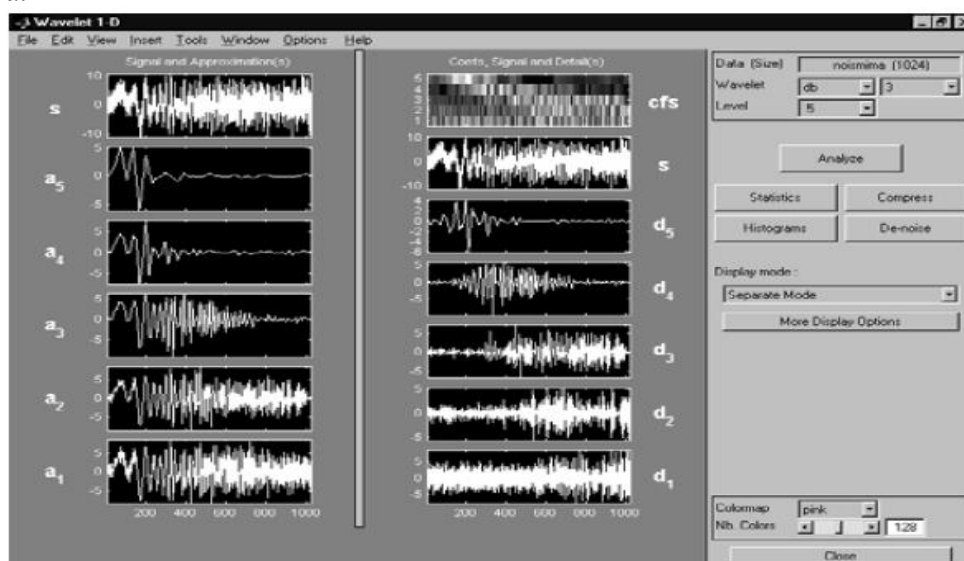


Рис. 1. Анализ и обработка речевого сигнала в программе Wavelet Toolbox
Fig. 1. Analysis and processing of the speech signal in the program Wavelet Toolbox

Под кнопкой анализа расположены еще 4 важные кнопки:

- Statistics — вывод окна с данными статистики;
- Histograms — вывод окна с гистограммами;
- Comptess — вывод окна компрессии сигнала;
- De-noise — вывод окна очистки сигнала от шума.

Следует также обратить внимание на кнопку More Display Options (дополнительные параметры дисплея). Она открывает панель параметров дисплея, которая позволяет уточнить многочисленные настройки дисплея.

Щелчок мышью на кнопке De-noise открывает окно очистки сигналов от шума — рис. 2. Это окно во многом напоминает окно компрессии сигналов. И это естественно — как компрессия, так и очистка сигналов реализуются в сущности одними и теми же методами и подчас общими функциями.

В этом окне мы найдем все возможности и методы очистки сигналов от шума. Так, на рис. 2 установлен мягкий тип порога *soft*, при котором на передаточной характеристике имеется горизонтальная ступень. В окне можно найти выпадающий список типов шумового обрамления сигналов и ползунковые регуляторы для индивидуального задания порогов каждого из вейвлет-коэффициентов.

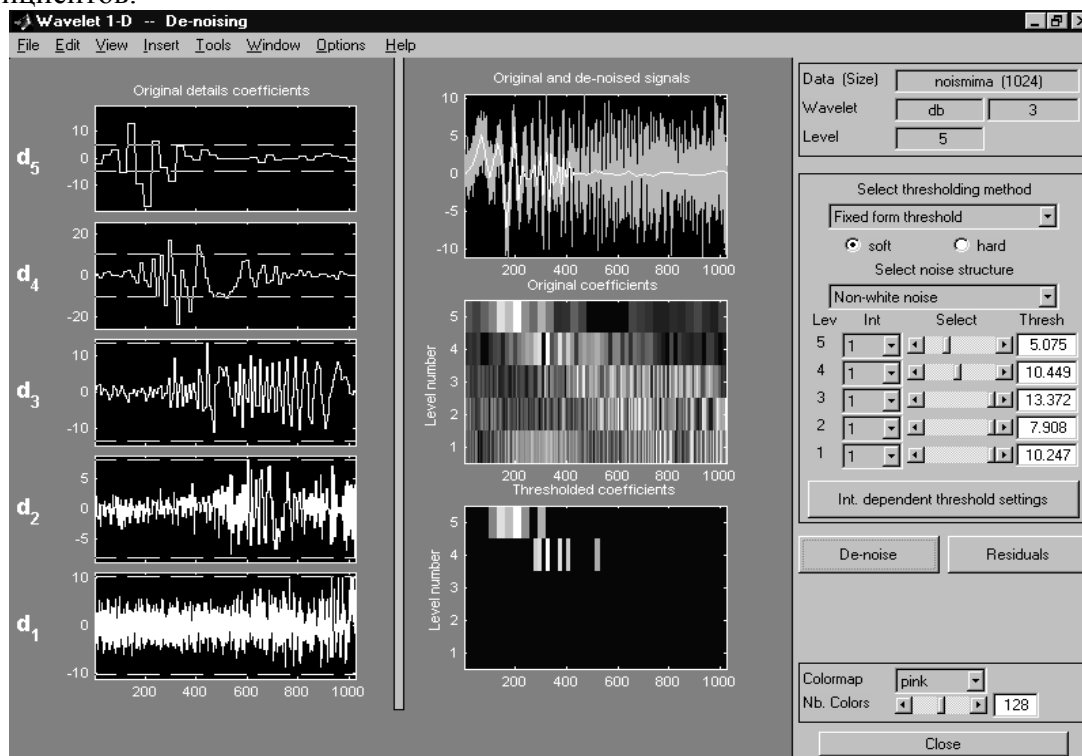


Рис. 2. Окно настройки очистки речевого сигнала от шума в режиме «Soft»

Fig. 2. Window for setting up speech signal cleaning in the “Soft” mode

Итак, первый из программных комплексов, как было отмечено ранее, является наиболее полным в плане представления вейвлетов разных семейств, а значит представляет для пользователя возможность выбора оптимального для анализа данного речевого сигнала вейвлета, что значительно позволяет облегчить исследователю процесс анализа и обработки. Как известно, выбор оптимального вейвлета базируется на простом принципе: вейвлет должен по форме походить на структуру анализируемого речевого сигнала, иными словами, для каждого сигнала представляется целесообразным выбрать наиболее подходящий тип вейвлета [2]. А чем больше набор типов в том или ином программном комплексе, тем выше возможность выбора именно того типа вейвлета, который будет наиболее подходящим для конкретного анализируемого сигнала.

Итак, большой набор вейвлетов, представленных в данном программном комплексе, можно считать одним из основных его преимуществ.

Еще одним достоинством программного комплекса следует считать относительно простой и понятный для любого пользователя интерфейс. Структура интерфейса представляет собой окно с набором вкладок, переключающих режим работы с вейвлетом, а также расположенных справа кнопок, каждая из которых отвечает за ту или иную функцию преобразования вейвлета, таких, как декомпозиция, очистка от шума, компрессия и т.д. Иными словами, исследователь, имеющий конкретную цель работы с анализируемым сигналом, может нажатием той или кнопки осуществить требующуюся операцию и просмотреть результаты операции в том же окне на графиках, располагающихся слева и по центру рабочего экрана. При этом дополнительные сведения

о математическом представлении того или иного типа вейвлета в виде функции не требуются, что может значительно облегчить работу специалиста.

Обратимся к рассмотрению второго программного комплекса. Он, на наш взгляд, обладает более сложным интерфейсом и требует от специалиста особых навыков работы с ним. Так, основной особенностью данного комплекса является математическое представление вейвлетов в виде функций. Имея представление о специфике изображения речевых сигналов виде функций в зависимости от особенностей сигнала и выбранного типа вейвлета, пользователь имеет возможность произвести требующиеся операции по анализу и обработке речевых сигналов с использованием данного программного комплекса. Однако, та же сама особенность программы затрудняет или замедляет процесс ее использования менее квалифицированному пользователю.

Разработчики данного программного комплекса – системы Mathcad одними из первых ввели в нее средства для работы с вейвлетами. В ядре системы имеются всего две функции такого рода — для прямого и обратного вейвлет-преобразований с вейвлетами Добеши DB4. Остальные средства сосредоточены в пакетах расширения системы, которые поставляются отдельно и перед использованием нуждаются в обычной инсталляции их. Вместе с пакетами расширения устанавливаются и становятся доступными электронные книги по ним. Пакет расширения системы Mathcad для реализации численных расчетов Numeric Recipes содержит восемь функций для вейвлет-преобразований [3].

Рассмотрим особенности интерфейса системы на примере алгоритма очистки речевого сигнала от шума. Примером эффективной очистки реальных сигналов от шума является обработка данных с установки для исследования ядерно-магнитного резонанса (ЯМР). Данные ее работы представлены в векторе nmr . На графике (рис. 3.) отчетливо видна заметная шумовая компонента данных.



Рис. 3. Пример обработки данных от установки для исследования ядерно-магнитного резонанса
Fig. 3. An example of data processing from the installation for the study of nuclear magnetic resonance

```

waveshrink(y,filter) :=
    J ← MaxDWTLevel(y)
    w ← dwt(y,J,filter)
    λ ← 2·log(length(y))
    σ ← median(|w - median(w)|)
    c ← λ·σ
    Jmax ← if(J > 8, J - 4, J)
    for js ∈ 1..Jmax
        d_js ← get_detail(w,js)
        d_js ← delta_shrink(d_js,c)
        w ← put_detail(w,js,d_js)
    y_r ← idwt(w,J,filter)
    y_r
    
```

Рис. 4. Программный модуль функции Waveshrink

Fig. 4. The program module of the Waveshrink function

С помощью функции Waveshrink (y,filter), использующей для фильтрации ограничения детализирующих коэффициентов в описываемом программном комплексе, можно существенно уменьшить уровень шумов, сохранив достаточно сложный характер сигнала от установки.

Более сложные методы обработки сигнала могут базироваться на адаптивных алгоритмах, предусматривающих выбор наилучшего базиса и отсечение части детализирующих коэффициентов в соответствии с особенностями сигнала. При этом возможно задание различных типов порогов для отсечения вейвлет-коэффициентов [4]. Они представлены на рис. 5. своими передаточными характеристиками.

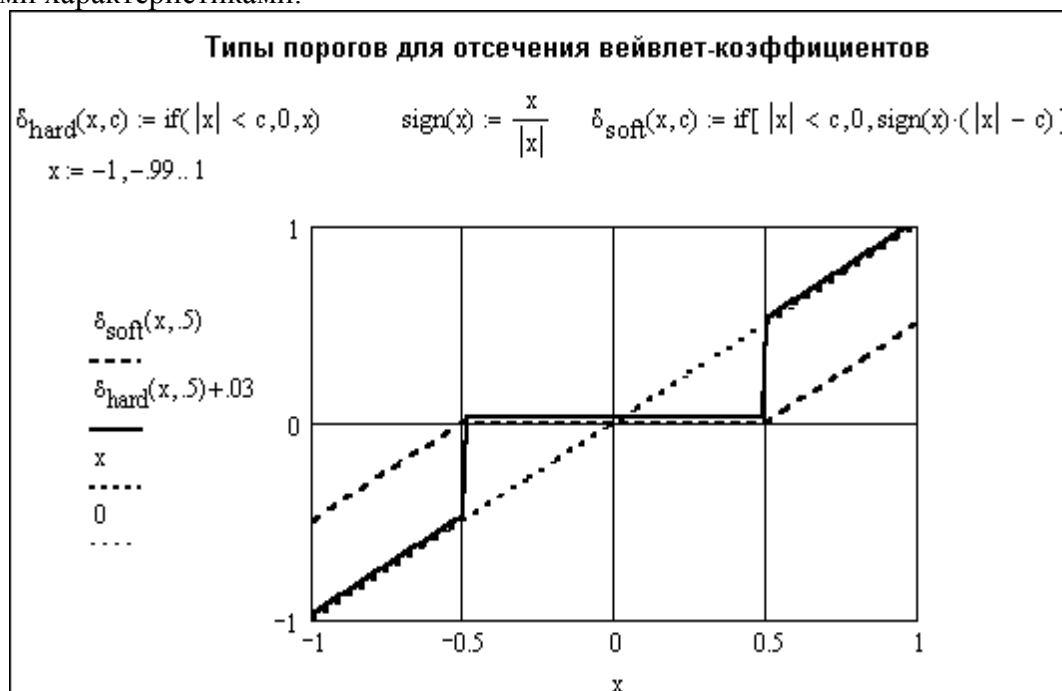


Рис. 5. Типы порогов для отсечения вейвлет-коэффициентов

Fig. 5. Types of thresholds for cutting off Wavelet coefficients

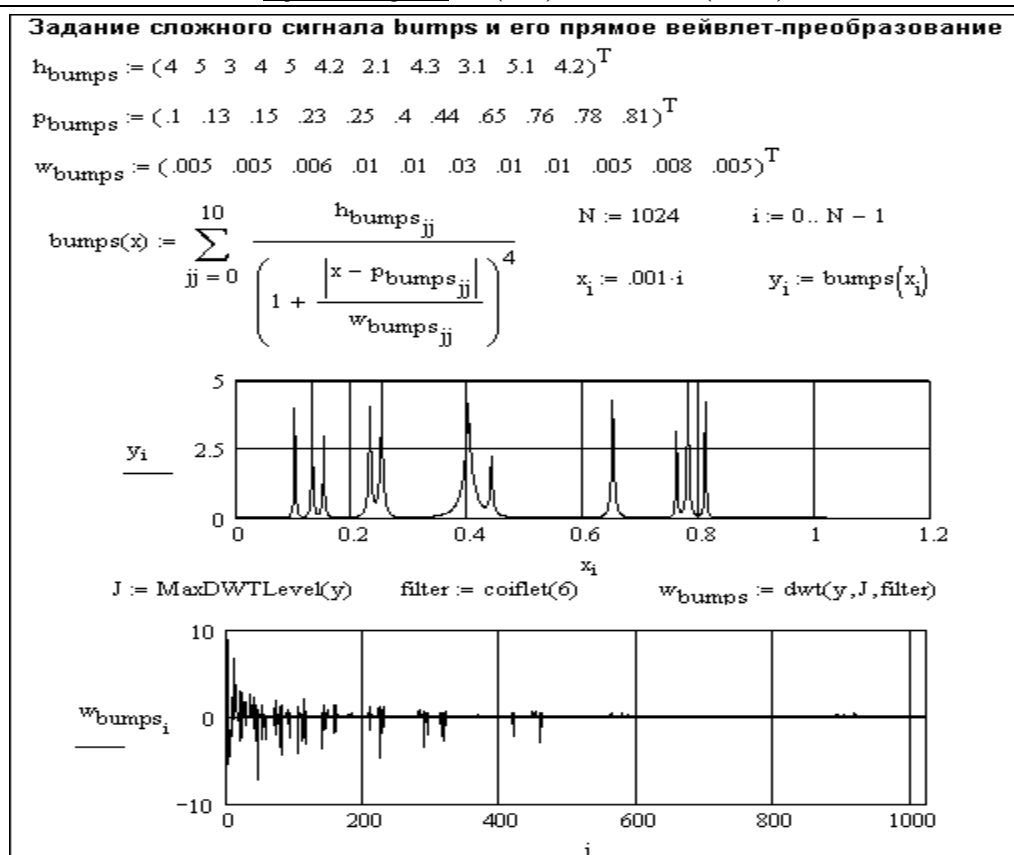


Рис. 6. Задание сложного сигнала и его вейвлет-преобразование

Fig. 6. The task of a complex signal and its Wavelet transform

Таким образом, к достоинствам данного комплекса можно отнести математическое представление вейвлета и его трансформаций в виде функции, наглядно иллюстрирующих квалифицированному специалисту особенности проведенных с вейвлетом операций, эту же особенность можно считать одновременно и недостатком комплекса, если работать с ним требуется менее квалифицированному в некоторых областях специалисту. Помимо общей концепции организации и интерфейса программы в числе недостатков также более узкий набор вейвлетов, представленный исключительно вейвлетами семейства Добеши, по сравнению с выше проанализированным комплексом, предоставляющим широкий выбор типов вейвлетов.

Наконец, обратимся к рассмотрению третьего программного комплекса. Его главной особенностью является представление операций по обработке речевых сигналов в виде команд для командой строки. Данную особенность можно считать или достоинством, или недостатком программы, в зависимости от уровня подготовки специалиста, с ней работающего. Отметим, что существует большое число пособий, обучающих работе с данным программным комплексом, с конкретным описанием команд, необходимых для обработки того или иного речевого сигнала, что, на наш взгляд, не является существенным препятствием для использования данного программного комплекса.

Система компьютерной математики Mathematica 4/5 является мировым лидером среди систем символьной математики (компьютерной алгебры) и разделяет это лидерство с другой системой этого же класса Maple 8/9. Последние версии Mathematica 4 и особенно Mathematica 5 содержат значительно усовершенствованные алгоритмы численных вычислений, что сделало их подлинно универсальными математическими системами, одинаково пригодными для выполнения аналитических вычислений и численных расчетов.

Для систем Mathematica 4/4.1/5 разработано свыше двух десятков внешних пакетов расширения, среди которых видное место занимает пакет Wavelet Explorer, содержащий средства вейвлет-технологии обработки сигналов и изображений. Этот пакет выполнен как документ системы Mathematica и хранится в виде файла Wavelets.m в директории MathApps. После установки пакета все его функции становятся определенными и доступными, а в справочной базе

данных формируется раздел, соответствующий этому пакету расширения и представляющий собой типичную электронную книгу с «живыми» примерами [5].

Рассмотрим специфику функционирования данного программного комплекса также на примере процесса очистки сигналов от шума. Как отмечалось ранее, технически она реализуется подобно операции компрессии — т.е. применением того или иного алгоритма удаления части вейвлет-коэффициентов. Эта операция основана на общеизвестном факте, что шумы имеют высокочастотные компоненты спектра, которые и удаляются при очистке сигналов от шума. Ниже иллюстрируется решение данной задачи в нескольких вариантах на базе данного программного комплекса.

В данном программном комплексе удобнее задавать алгоритмы работы с речевыми сигналами в виде команд, вводимых в командной строке. Покажем на конкретных примерах, какие программы отвечают за тот или иной процесс обработки сигнала.

Прежде всего, подготовим сигнал с шумом, подвергающийся в дальнейшем очистке. В состав пакета Wavelet Explorer входит файл shocknoi.dat с записью дискретных отсчетов зашумленного сигнала. Приведенные ниже команды считывают этот файл, создают массив data зашумленного сигнала и строят его график в виде графика функции $u(x)$:

```
data = Get[ToFileName[{"Wavelets", "Data"}, "shocknoi.dat"]];  
ListPlot[data, PlotJoined -> True, AxesLabel -> {"x", "u(x)"}]
```

График обрабатываемого сигнала представлен на рис. 6.

Для очистки сигнала зададим сплайновый фильтр s4 порядка, выполним прямое вейвлет-преобразование массива data с компрессией на основе адаптируемого порога с начальным значением 1.5 и затем обратное преобразование. Все это реализуется приведенными ниже командами [6]:

```
(s4 = SplineFilter[4, 8]; wtdata = WaveletTransform[data, s4];)  
Compress[Rest[wtdata], 1.5, Shrinking -> True];  
InverseWaveletTransform[Join[{wtdata[[1]]}, %], s4];  
ListPlot[%, PlotJoined -> True, AxesLabel -> {"x", "u(x)"}]
```

Очищенный от шума сигнал представлен на рис. 7. Нетрудно заметить, что шумовая компонента сигнала практически исчезла, а детальность сигнала осталась достаточно хорошей.

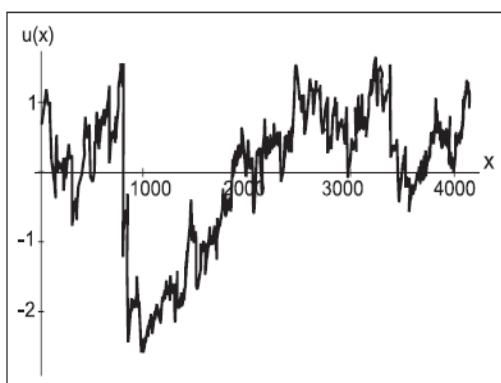


Рис. 7. График зашумленного сигнала
Fig. 7. Schedule noisy Figure

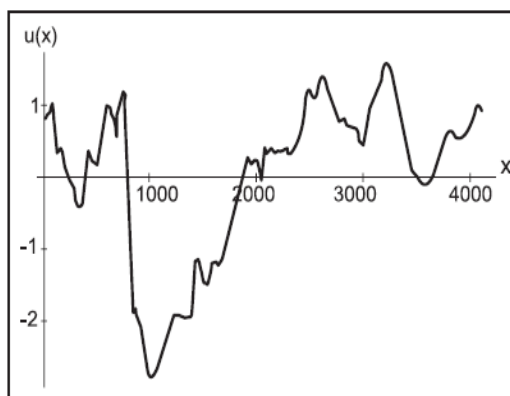


Рис. 8. График сигнала, очищенного
от шума методом с адаптивным порогом
Fig. 8. Signal graph with adaptive threshold
Noise-free signal

Таким образом, по нашему мнению, наиболее совершенным, полным в плане набора функций обработки речевых сигналов с использованием вейвлетов, а также наглядным и относительно простым в использовании можно считать первый программный комплекс.

Вывод. В заключении отметим, что имеющиеся пособия по обработке сигналов с использованием вейвлетов разного типа позволяют освоить функционал любой из вышеназванных программ. Однако, немаловажным фактором является сфера применения вейвлет-анализа речевого

сигнала. Так, если самоцелью анализа речевого сигнала является выявление его особенностей, которые можно изобразить в виде математической формулы или графика и оставить в таком виде, то использование второго и третьего программного комплекса является оптимальным.

Если же из вейвлет-анализа требуется извлечь дополнительную информацию, напрямую следующую из особенностей полученного изображения графика вейвлета, предпочтителен выбор программы с наиболее простым и понятным интерфейсом, позволяющим осуществить преобразования быстрее и проще, как в рамках первого программного комплекса. Например, если целью вейвлет-анализа речевого сигнала является идентификация личности говорящего, оценка его эмоционального состояния, оценка подлинности фонограммы (что требуется, например, в сфере судмедэкспертизы), на наш взгляд, целесообразнее воспользоваться первым программным комплексом для анализа и обработки сигнала с последующей его визуализацией и представлением его в виде сонограммы.

Библиографический список:

1. Малла С. Вейвлеты в обработке сигналов. – М: Мир. 2005. – С. 92-98.
2. Штарк Г. Применение вейвлетов для ЦОС. – М: Техносфера, 2007. – С. 78-81.
3. Смоленцев Н.К. Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в MATLAB. – М.: ДМК-Пресс. – 2005. – С. 45-46.
4. Дьяконов В.П. Вейвлеты. – М: Солон-Р, 2010. – С. 32-36.
5. Дворянkin С.В., Клочкова Е.Н., Калужин Р.В. Маскирование речевых сообщений на основе современных компьютерных технологий. // М.: Специальная техника, 2001. – № 3. С. 92-94.
6. Дьяконов В.П. Вейвлеты. От теории к практике. - М.: СОЛОН-Р, 2002. – С. 18-28.
7. T. Aach. New criteria for shift variance and wide-sense cyclostationarity in multirate filter banks. In Proc. IEEE Int. Workshop on Spectral Methods and Multirate Signal Proc., pages 7–13, Florence, Italy, 2006.
8. T. Aach. Comparative analysis of shift variance and cyclostationarity in multirate filter banks. IEEE Trans. Circ. and Syst., 54(5):1077–1087, May 2007.
9. N. I. Akhiezer and I. M. Glazman. Theory of Linear Operators in Hilbert Spaces, volume 1. Frederick Ungar Publishing, 1966.
10. S. Akkarakaran and P. P. Vaidyanathan. Bifrequency and bispectrum maps: A new look at multirate systems with stochastic inputs. IEEE Trans. Signal Proc., 48(3):723–736, March 2000.
11. M. Antonini, M. Barlaud, P. Mathieu, and I. Daubechies. Image coding using wavelet transform. IEEE Trans. Image Proc., 1(2):205–220, April 1992.
12. P. Auscher. Wavelets: Mathematics and Applications, chapter Remarks on the local Fourier bases, pages 203–218. CRC Press, 1994
13. M. G. Bellanger and J. L. Daguët. TDM-FDM transmultiplexer: Digital polyphase and FFT. IEEE Trans. Commun., 22(9):1199–1204, September 1974.
14. J. J. Benedetto and M. C. Fickus. Finite normalized tight frames. Adv. Comp. Math., sp. iss. Frames, 18:357–385, 2003.
15. B. G. Bodmann, P. G. Casazza, and G. Kutyniok. A quantitative notion of redundancy for finite frames. In Journ. Appl. and Comput. Harmonic Analysis, 2010.
16. C. Herley and M. Vetterli. Biorthogonal bases of symmetric compactly supported wavelets. In M. Farge and et al., editors, Proc. Wavelets, Fractals and Fourier Transforms. Oxford Univ. Press, 1991.
17. C. Herley and M. Vetterli. Wavelets and recursive filter banks. IEEE Trans. Signal Proc., August 1993.
18. C. Herley and M. Vetterli. Orthogonal time-varying filter banks and wavelet packets. IEEE Trans. Signal Proc., 42(10):2650–2663, October 1994.

References:

1. Malla S. Veyvlety v obrabotke signalov. – M: Mir. 2005. – S. 92-98. [Malla S. Wavelets in signal processing. - M: Peace. 2005. pp. 92-98. (In Russ)]
2. Shtark G. Primeneniye veyvletov dlya TSOS. – M: Tekhnosfera, 2007. – S. 78-81. [Stark G. Application of wavelets for DSP. - M: Technosphere, 2007. - p. 78-81. (In Russ)]
3. Smolentsev N.K. Osnovy teorii veyvletov. Veyvlety v MATLAB. – М.: DMK-Press. – 2005. – S. 45-46. [Smolentsev N.K. Fundamentals of the theory of wavelets. Wavelets in matlab. - М.: DMK-Press. - 2005. - pp. 45-46. (In Russ)]
4. D'yakonov V.P. Veyvlety. – М: Solon-R, 2010. – S. 32-36. [Dyakonov V.P. Wavelets - M: Solon-R, 2010. - p. 32-36. (In Russ)]
5. Dvoryankin S.V., Klochkova Ye.N., Kaluzhin R.V. Maskirovaniye rechevykh soobshche-niy na osnove sovremennykh komp'yuternykh tekhnologiy. // М.: Spetsial'naya tekhnika, 2001. – № 3. S. 92-94. [Dvoryankin S.V., Klochkova E.N., Kaluzhin R.V. Masking of speech communications on the basis of modern computer technologies. // М.: Special equipment, 2001. - № 3. S. 92-94. (In Russ)]
6. D'yakonov V.P. Veyvlety. Ot teorii k praktike. - М.: SOLON-R, 2002. – S. 18-28. [Dyakonov V.P. Wavelets From theory to practice. - М.: SOLON-R, 2002. - p. 18-28. (In Russ)]

7. T. Aach. New criteria for shift variance and wide-sense cyclostationarity in multirate filter banks. In Proc. IEEE Int. Workshop on Spectral Methods and Multirate Signal Proc., pages 7–13, Florence, Italy, 2006.
8. T. Aach. Comparative analysis of shift variance and cyclostationarity in multirate filter banks. IEEE Trans. Circ. and Syst., 54(5):1077–1087, May 2007.
9. N. I. Akhiezer and I. M. Glazman. Theory of Linear Operators in Hilbert Spaces, volume 1. Frederick Ungar Publishing, 1966.
10. S. Akkarakaran and P. P. Vaidyanathan. Bifrequency and bispectrum maps: A new look at multirate systems with stochastic inputs. IEEE Trans. Signal Proc., 48(3):723–736, March 2000.
11. M. Antonini, M. Barlaud, P. Mathieu, and I. Daubechies. Image coding using wavelet transform. IEEE Trans. Image Proc., 1(2):205–220, April 1992.
12. P. Auscher. Wavelets: Mathematics and Applications, chapter Remarks on the local Fourier bases, pages 203–218. CRC Press, 1994
13. M. G. Bellanger and J. L. Daguet. TDM-FDM transmultiplexer: Digital polyphase and FFT. IEEE Trans. Commun., 22(9):1199–1204, September 1974.
14. J. J. Benedetto and M. C. Fickus. Finite normalized tight frames. Adv. Comp. Math., sp. iss. Frames, 18:357–385, 2003.
15. B. G. Bodmann, P. G. Casazza, and G. Kutyniok. A quantitative notion of redundancy for finite frames. In Journ. Appl. and Comput. Harmonic Analysis, 2010.
16. C. Herley and M. Vetterli. Biorthogonal bases of symmetric compactly supported wavelets. In M. Farge and et al., editors, Proc. Wavelets, Fractals and Fourier Transforms. Oxford Univ. Press, 1991.
17. C. Herley and M. Vetterli. Wavelets and recursive filter banks. IEEE Trans. Signal Proc., August 1993.
18. C. Herley and M. Vetterli. Orthogonal time-varying filter banks and wavelet packets. IEEE Trans. Signal Proc., 42(10):2650–2663, October 1994.

Сведения об авторах:

Довгаль Виктор Митрофанович – доктор технических наук, профессор, кафедра программного обеспечения и администрирования информационных систем.

Хеин Мин Зо – аспирант, кафедра программного обеспечения и администрирования информационных систем.

Information about the authors.

Victor M. Dovgal – Dr. Sci. (Technical), Prof., Software department and administration information systems.

Hein Min Zoh – Graduate student, Software department and administration information systems.

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию 23.07.2018.

Received 23.07.2018.

Принята в печать 01.09.2018.

Accepted for publication 01.09.2018.

Для цитирования: Дровникова И.Г., Змеев А.А., Rogozin E.A. Частная методика формирования требований к системам защиты информации от несанкционированного доступа в автоматизированные системы с использованием генетического алгоритма. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2018; 45(3): 114-122. DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-3-114-122

For citation: Drovnikova I.G., Zmeev A.A., Rogozin E.A. Private technique of formation of requirements to information protection systems from unauthorized access to automated bath systems using genetic algorithm. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2018; 45(3): 114-122. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-3-114-122

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 621.3

DOI: 10.21822/2073-6185-2018-45-3-114-122

ЧАСТНАЯ МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ ТРЕБОВАНИЙ К СИСТЕМАМ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ ОТ НЕСАНКЦИОНИРОВАННОГО ДОСТУПА В АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА

Дровникова И.Г.¹, Змеев А.А.², Rogozin E.A.³

^{1,3} Воронежский институт Министерства внутренних дел Российской Федерации,
^{1,3}394065, г. Воронеж, пр. Патриотов, 53, Россия,

²Военная академия воздушно-космической обороны им. Г.К. Жукова,
²170022, Россия, г. Тверь, ул. Жигарева, 50, Россия,

¹e-mail: idrovnikova@mail.ru, ²e-mail: tzmeev@yandex.ru, ³e-mail: evgenirogozin@yandex.ru

Резюме. Цель. Анализ существующей методики формирования требований к системам защиты информации (СЗИ) от несанкционированного доступа (НСД) в автоматизированные системы (АС) выявил ряд существенных недостатков, основным из которых является следующий: несмотря на то, что рассматриваемая методика, несомненно, обладает теоретической значимостью, в то же время, она не может претендовать на практическую ценность. Это связано с тем, что в указанной методике исследования проводились не на конкретной типовой (широко используемой сертифицированной согласно нормативным документам Федеральной службы по техническому и экспортному контролю России) СЗИ, и приведённые в ней данные по угрозам НСД не соответствуют реальности (морально устарели), а, следовательно, требуют существенного обновления. Приняв существующую методику в качестве базовой, целью статьи является разработка частной методики формирования требований к СЗИ от НСД в АС, обладающей практической ценностью и позволяющей формировать количественные требования к широкому классу сертифицированных СЗИ. **Метод.** При написании статьи использованы методы системного анализа, эволюционного моделирования, теории вероятностей и математической статистики, математического аппарата для моделирования динамических дискретных сетей (Е-сетей), теории алгоритмов. Методологической основой является системный подход. **Результат.** Разработана частная методика, определяющая параметры символьного генетического алгоритма (ГА) для создания программного комплекса анализа, эволюционного моделирования и формирования количественных требований к СЗИ от НСД в АС при использовании возможностей пакета прикладных программ Matlab 13 для реализации ГА в среде программирования Optimization toolbox. **Вывод.** Предложенная частная методика формирования требований к СЗИ от НСД в АС с использованием ГА обладает теоретической значимостью, практической ценностью и позволяет формировать количественные требования к широкому классу сертифицированных по определённому классу защищённости АС в соответствии требованиями действующей нормативной документации.

Ключевые слова: автоматизированная система, система защиты информации, несанкционированный доступ, генетический алгоритм, оценочная сеть (Е-сеть), марковская модель

TECHNICAL SCIENCE
COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT

PRIVATE TECHNIQUE OF FORMATION OF REQUIREMENTS
TO INFORMATION PROTECTION SYSTEMS FROM UNAUTHORIZED
ACCESS TO AUTOMATED BATH SYSTEMS USING GENETIC ALGORITHM

Irina G. Drovnikova¹, Anatoly A. Zmeev², Evgenii A. Rogozin³

^{1,3}Voronezh Institute of the Ministry of the Interior of the Russian Federation,

^{1,3}53 Patriotov Str., Voronezh 394065, Russia,

²G.K. Zhukov Military Academy of Aerospace Defense,

²50 Zhigareva Str., Tver, 2170022, Russia,

¹e-mail: idrovnikova@mail.ru, ²e-mail: tzmeev@yandex.ru, ³e-mail: evgenirogozin@yandex.ru

Abstract. Objectives Analysis of the existing methodology for the formation of requirements for information protection systems (GIS) from unauthorized access (NSD) to automated systems (AS) revealed a number of significant flaws, the main of which is the following: despite the fact that the considered method undoubtedly has theoretical significance, the same time, it can not claim practical value. This is due to the fact that in this methodology, the studies were carried out not on a specific standard (widely used certified according to the regulations of the Federal Service for Technical and Export Control of Russia) GIS, and the data on threats of unauthorized access given in it do not correspond to reality (morally obsolete), but therefore require a significant upgrade. Accepting the existing methodology as a baseline, the purpose of the article is to develop a private method of forming requirements for GIS from unauthorized access to the AU, which has practical value and allows you to formulate quantitative requirements for a wide class of certified GIS. **Method.** When writing the article, the methods of system analysis, evolutionary modeling, probability theory and mathematical statistics, mathematical apparatus for modeling dynamic discrete networks (E-networks), and theory of algorithms were used. The methodological basis is a systematic approach. **Result.** A private methodology has been developed that determines the parameters of the symbolic genetic algorithm (GA) for creating a software package for analysis, evolutionary modeling, and forming quantitative requirements for GIS from unauthorized access to speakers using the Matlab 13 application software to implement GA in the Optimization toolbox programming environment. **Conclusion.** The proposed private method of forming requirements for GIS from unauthorized access in the AU using GA has a theoretical significance, practical value and allows you to formulate quantitative requirements for a wide class of AS certified in a certain class of security in accordance with the requirements of current regulatory documentation.

Keywords: automated system, information protection system, unauthorized access, genetic algorithm, evaluation network (E-network), Markov model

Введение. Опыт эксплуатации современных АС показал, что наибольший вклад в снижение их надёжности и работоспособности вносят факторы, связанные с НСД к информационному ресурсу этих систем [1, 2]. В соответствии с руководящими документами ФСТЭК России [3] основным элементом противодействия угрозам НСД в АС является СЗИ от НСД. Следовательно, ключевым вопросом современной теории защиты информации (ЗИ) от НСД в АС является формирование требований к СЗИ данных систем.

Одним из перспективных направлений решения этой сложной проблемы рассматривается использование методов эволюционного моделирования, реализованное в конкретную методику, представленную в [2]. Её анализ показал, что данная методика, несомненно, обладает теоретической значимостью, однако вопросы, связанные с её практической ценностью, исследованы в недостаточном объёме и нуждаются в существенной доработке. Следовательно, приняв существующую методику в качестве основной (базовой), необходимо разработать частную методику, обладающую практической значимостью и позволяющую формировать количественные требования к широкому классу сертифицированных СЗИ от НСД в АС, чему и посвящена данная статья.

Постановка задачи. Для устранения имеющихся недостатков базовой методики в процессе разработки частной методики можно выделить следующие основные направления исследований:

1. Анализ существующих широко используемых сертифицированных СЗИ от НСД с целью создания их вербальной модели, лежащей в основе построения формальной модели процесса функционирования этих систем с использованием оценочных сетей (Е-сетей).

2. На основе теории марковских процессов создание математической модели процесса функционирования защищённой АС, позволяющей получить адекватную модель случайных процессов, которую можно использовать в качестве основы целевой функции (функции приспособленности) решения задачи оптимизации параметров и характеристик функционирования СЗИ от НСД в АС.

3. По результатам анализа [1, 4] определение наиболее опасных угроз НСД с точки зрения последствий их реализации в АС и разработка графовых моделей данных деструктивных воздействий, которые послужат основой для исследования их вероятностно-временных характеристик (значений средних времён нахождения каждой из угроз в одном из состояний графовой модели) в программной среде имитационного моделирования CPN Tools.

4. Определение параметров символьного ГА (размера популяций, типа селекции, генетических операторов и их вероятностей, величины разрыва поколений) для разработки программного комплекса анализа, эволюционного моделирования и формирования количественных требований к СЗИ от НСД в АС при использовании возможностей пакета прикладных программ Matlab 13 для реализации ГА в среде программирования Optimization toolbox.

Методы исследования. Для проведения исследований необходимо по результатам анализа [3] построить вербальную модель широко используемой сертифицированной СЗИ от НСД «Dallas lock», которая устанавливается на ПЭВМ, работающих под управлением операционных систем семейств Windows и Linux. При разработке АС в защищённом исполнении данная СЗИ от НСД имеет сертификат по 1Б, 1В, 1Г, 1Д, 2А, 2Б, 3А, 3Б классам защищённости. «Dallas lock» используется как в государственных, так и в коммерческих структурах, имея множество сертификатов совместимости с другими программными продуктами.

«Dallas lock» включает в себя шесть подсистем обеспечения ЗИ в АС [2]: самодиагностики, управления доступом, администрирования параметров СЗИ от НСД, идентификации и аутентификации пользователей, контроля целостности рабочей среды пользователей АС, регистрации и учёта. При проведении и анализе современных исследований процесса функционирования сложных систем [2], к которым, безусловно, следует отнести и СЗИ от НСД, рекомендуется использовать методы математического моделирования.

Одним из основных этапов, определяющих качество создания математической модели СЗИ от НСД в АС, является формализация процесса функционирования данной СЗИ. Перспективным подходом к построению формальной модели процесса функционирования СЗИ от НСД является представление этого процесса в виде ориентированного графа [4]. Ориентированный граф также можно рассматривать как общий математический объект, специально не предназначенный для создания модели функционирования СЗИ от НСД в её динамике. Следовательно, с целью формализованного описания СЗИ от НСД в виде ориентированного графа необходимо в рамках графового подхода разработать частные математические объекты данной модели. Анализ подобных математических объектов позволил для разработки математической модели динамики функционирования СЗИ от НСД в АС использовать оценочные сети (Е-сети), являющиеся дальнейшим развитием сетей Петри [5 – 7].

Процесс построения оценочной сети подробно изложен в [6, 7], поэтому его теоретическая часть в данной статье не приводится. Основные элементарные сети формального описания процесса функционирования СЗИ от НСД в АС, состоящие из 2 видов оценочных сетей – сети типа J (объединение) и сети типа X (переключатель), представлены в табл. 1, где r , x_i , y_j – соответственно разрешающая, входная и выходная позиции объекта (состояния функционирования СЗИ от НСД); $i = 1, 2, \dots, m$; $j = 1, 2, \dots, n$; m и n – соответственно количество входных и выходных позиций.

Таблица 1. Основные элементарные сети формального описания процесса функционирования СЗИ от НСД в АС

Table 1. The main elementary networks of the formal description of the process of functioning of GIS from unauthorized access to the AU

Тип перехода Type of transition	Графическое представление Graphic representation	Условное обозначение Conventional symbol
Объединение Union		$J(x_1, x_2, \dots, x_m, y)$
Переключатель Switch		$X(r, x_1, x_2, \dots, x_m, y_1, y_2, \dots, y_n)$

На рис. 1 изображена оценочная сеть процесса функционирования широко используемой сертифицированной СЗИ от НСД «Dallas lock». Нахождение СЗИ от НСД в простой позиции определяет выполнение функции ЗИ, номер которой обозначен в кружочке, отображающем данную позицию.

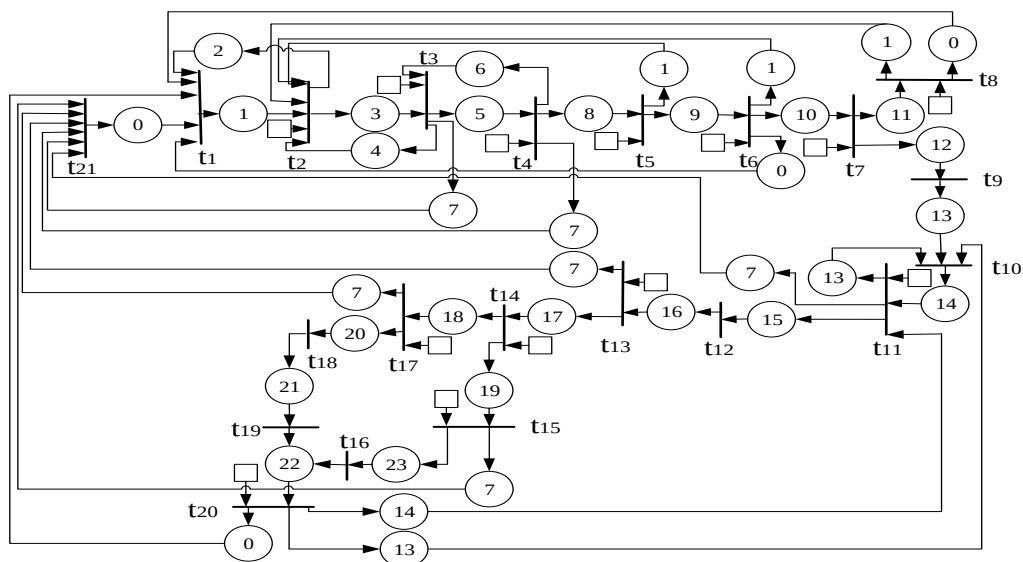


Рис. 1. Оценочная сеть процесса функционирования широко используемой сертифицированной СЗИ от НСД «Dallas lock»

Fig. 1. Evaluation network of the widely used certified DSS from the unauthorized access control system “Dallas lock”

Таблица 2. Сведения о сервисных функциях ЗИ с временами их выполнения (в секундах) и соответствующими элементарными сетями, отображающих функционирование СЗИ от НСД «Dallas lock»

Table 2. Information about the information protection service functions with the time of their execution (in seconds) and the corresponding elementary networks that display the functioning of the information protection system against unauthorized access “Dallas lock”

Номер и наименование функции СЗИ от НСД Number and name of the function information security systems against unauthorized access	Номер перехода Transition number	Элементарная сеть Elementary network
1. Ввод имени пользователя (авторизация). Enter user name (authorization)	t_1	$J(x_0, x_0, x_0, x_0, x_0, x_2, y_1)$
2. Повторный ввод имени пользователя. Re-enter username	t_2	$X(r_1, x_1, x_1, x_1, x_1, x_4, y_2, y_3)$
3. Ввод пароля. Password entry	t_3	$X(r_2, x_3, x_6, y_4, y_5, y_7)$
4. Повторный ввод пароля. Re-enter password	t_4	$X(r_2, x_3, y_6, y_7, y_8)$
5. Ввод идентификатора. ID entry	t_5	$X(r_4, x_8, y_1, y_9)$
6. Повторный ввод идентификатора. Re-enter id	t_6	$X(r_4, x_8, y_1, y_9)$
7. Блокировка в случае неоднократно неправильно введенного пароля, несоответствия пользователя и предъявляемого идентификатора. Blocking in case of repeatedly incorrectly entered password, user mismatch and identifier being shown	t_7	$X(r_5, x_{10}, y_{11}, y_{12})$
8. Проверка доступного времени работы пользователя Check available user time	t_8	$X(r_6, x_{11}, y_0, y_1)$
9. Контроль доступа Access control	t_9	$J(x_{12}, y_{13})$
10. Проверка срока действия пароля Verify password expiration	t_{10}	$J(x_{13}, x_{13}, x_{13}, y_{14})$
11. Разрешений на изменение пароля Password change permissions	t_{11}	$X(r_7, x_{14}, x_{14}, y_7, y_{13}, y_{15})$
12. Вход в систему Login to the system	t_{12}	$J(x_{15}, y_{16})$
13. Обращение к ресурсу Addressing a resource	t_{13}	$X(r_8, x_{16}, y_7, y_{17})$
14. Мандатный механизм управления доступом. Соотносятся метки конфиденциальности пользователя и ресурса. Mandatory access control mechanism. Associate user privacy and resource labels	t_{14}	$X(r_9, x_{17}, y_{18}, y_{19})$
15. Обращение к объекту Appeal to the object	t_{15}	$X(r_{10}, x_{17}, y_7, y_{23})$
16. Проверка полномочий доступа пользователя, основанного на дискреционном принципе контроля доступа Authorization of user access based on discretionary principle of access control	t_{16}	$J(x_{23}, y_{22})$
17. Допуск субъекта к защищаемому объекту The subject's admission to the protected object	t_{17}	$X(r_{11}, x_{18}, y_7, y_{23})$
18. Запрос на преобразование объекта. Request for object conversion	t_{18}	$J(x_{20}, y_{21})$
19. Запрос на удаление Request for deletion	t_{19}	$J(x_{21}, y_{22})$
20. Преобразование объекта перед удалением Convert the object before deleting	t_{20}	$X(r_{22}, x_{18}, y_0, y_{13}, y_{14})$
21. Удаление объекта Deletion of an object		
22. Завершение работы с объектом Completion of work with the object	t_{21}	$J(x_7, x_7, x_7, x_7, x_7, x_7, y_0)$
23. Пересчет параметров целостности объекта Recalculation of the parameters of the integrity of the object		

В табл. 2 представлены функции ЗИ с временами их выполнения (в секундах) и соответствующими элементарными сетями.

Случайные переходы между состояниями функционирования СЗИ от НСД реализуются разрешающими процедурами. Данные переходы принято считать равновероятными, т.е. вероятность P_{ij} перехода из состояния i в последующее за ним состояние j равна $P_{ij} = 1/K$, где K – общее количество переходов из состояния i .

С целью оценки эффективности функционирования типовой СЗИ от НСД «Dallas lock» проведём анализ разработанной оценочной сети, приведённой на рис. 1, с использованием основных положений теории марковских процессов [8, 9]. Поскольку оценочная сеть представляет собой случайный марковский процесс с конечным числом состояний (марковскую цепь), то в соответствии с [8] время пребывания системы в одном из состояний аппроксимируется экспоненциальным законом распределения.

Полагаем, что основные функции СЗИ от НСД будут реализованы в АС, если время $\tau_{\text{итт}}$ (время выполнения основных функциональных задач СЗИ от НСД) не превышает значения максимально допустимого времени τ_{max} , приведённого в технической документации на защищённую АС в разделе «Защита информации от НСД» [3].

Учитывая, что процесс функционирования СЗИ от НСД представляет собой случайный процесс, формула для оценки эффективности функционирования этих систем примет вид [9] $K_{\text{эф}} = P(\tau_{\text{итт}} \leq \tau_{\text{max}})$, где: $K_{\text{эф}}$ – показатель временной эффективности программных систем (т.е. способность СЗИ от НСД выполнять заданные действия в интервале времени, отвечающем заданным требованиям), позволяющий описывать защищённость АС; P – вероятность своевременного выполнения СЗИ декларируемых функций.

Из [8] известно, что марковский процесс с конечным числом состояний описывается матрицей вероятностей переходов СЗИ от НСД в одно из состояний $n = \overline{1, 27}$.

Далее определяется система уравнений, представляющая собой расчёт переходных вероятностей, которая стандартным образом [10] может быть решена итерационным методом Зейделя, подробно изложенным в [8]. Достоинство предложенного метода состоит в простоте его алгоритма, самоуправляемости и удобстве реализации, экономичности с точки зрения необходимой памяти при проведении расчётов по сравнению с методами Гаусса и Гивенса. Недостатком метода является его возможная расходимость [8].

Алгоритм для оценки показателя эффективности функционирования СЗИ от НСД «Dallas lock» на основе использования итерационного метода Зейделя представлен на рис. 2.

Описание работы алгоритма:

1 – сбор информации о функционировании СЗИ от НСД, а именно получение статистических данных о работе каждой её составной части при помощи программных или технических средств;

2 – ввод полученных данных в программный комплекс с целью оценки эффективности исследуемой СЗИ от НСД;

3 – определение среднего времени ожидания выполнения функцией СЗИ от НСД возложенных на неё задач при реализации ЗИ в АС;

4 – преобразование Лапласа для получения системы линейных алгебраических уравнений;

5, 6, 7 – перебор всех полученных значений и выполнение преобразования Лапласа для получения системы линейных алгебраических уравнений;

8 – задание требуемой точности ϵ и ϵ_{max} равной нулю для того, чтобы на последующих этапах сразу не закончилось прохождение по алгоритму;

9, 10, 11 – проверка условия сходимости: если i не равно j , то необходимо и достаточно, чтобы все собственные значения матрицы были по модулю меньше единицы; тогда продолжается движение по алгоритму, в противном случае – условие не выполнено;

12 – проверка условия: если требуемая точность меньше, то считается, что найдены значения всех неизвестных в системе линейных алгебраических уравнений; в противном случае поиск нужных значений продолжается;

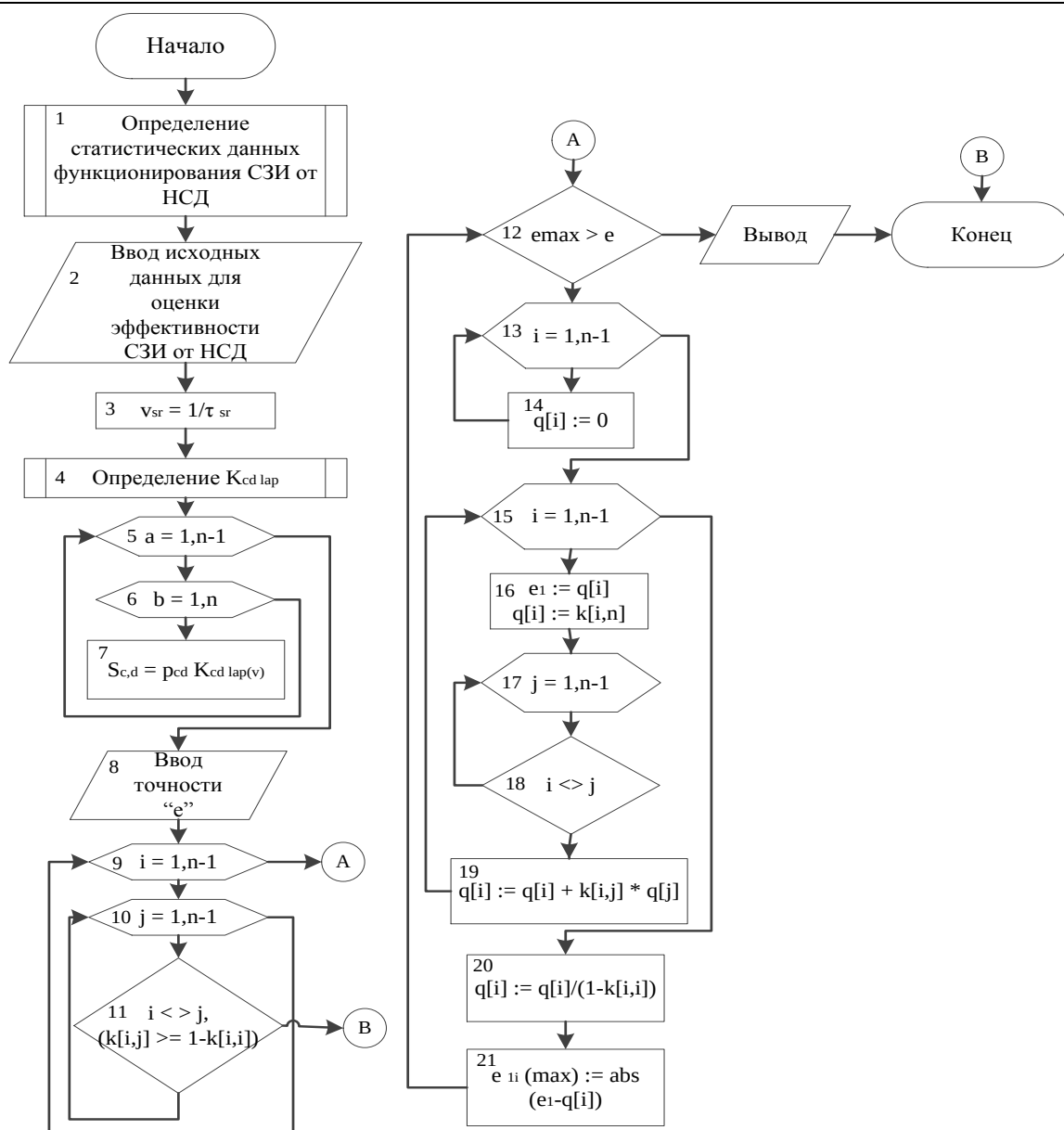


Рис. 2. Алгоритм оценки показателя эффективности функционирования СЗИ от НСД «Dallas lock» на основе итерационного метода Зейделя

Fig. 2. Algorithm for evaluating the performance of the information security system from unauthorized access "Dallas lock" based on the iterative method of Seidel

13, 14 – задание начального вектора q_i ;

15, 16, 17, 18, 19 – подсчёт значений неизвестных на текущей итерации: если i не равно j , то используются значения, либо полученные ранее, либо подсчитанные на этой итерации;

20 – деление на коэффициент при i -ой неизвестной;

21 – подсчёт абсолютной величины разности между элементами предыдущего и текущего шагов.

Обсуждение результатов. В настоящее время создание методики формирования количественных параметров (характеристик) эффективности функционирования существующих и перспективных (разрабатываемых) СЗИ от НСД в АС является довольно сложной и актуальной проблемой.

Это связано с тем, что существующая методика формирования требований к СЗИ от НСД в соответствии с действующей нормативной документацией определяет требования на уровне функционала (согласно классу защищённости АС) и не учитывает динамические свойства СЗИ,

что приводит к увеличению времени отклика на запрос пользователя в АС и является неприемлемым для эффективного функционирования этих систем. Согласно пункту 3.6 [11] для устранения указанного недостатка необходимо проводить количественную оценку эффективности СЗИ от НСД для исследования их динамических свойств. Перспективной в этом смысле является предложенная частная методика, базирующаяся на теории математического и эволюционного моделирования, поскольку позволяет получать оптимальные количественные параметры эффективности функционирования СЗИ от НСД [2, 12, 13].

Вывод. Таким образом, в статье предложена частная методика формирования требований к СЗИ от НСД в АС с использованием генетического алгоритма, избавленная от недостатков существующей методики, изложенной в [2]. Разработанная частная методика обладает практической ценностью и позволяет формировать количественные требования к широкому классу сертифицированных по определённому классу защищённости АС в соответствии требованиями действующей нормативной документации.

Библиографический список:

1. Доктрина информационной безопасности Российской Федерации. Утв. Указом Президента Российской Федерации № 646 от 05.12.2016.
2. Методы и средства эволюционного моделирования при обосновании требований к программным системам защиты информации: монография / А.А. Змеев [и др.]; под ред. проф. Е.А. Rogozina. – Воронеж: Воронежский институт МВД России, 2015. – 98 с.
3. Типовая система защиты информации от несанкционированного доступа RU.48957919.501410-0231 // Техническая документация. – Государственный научно-исследовательский институт моделирования интеллектуальных сложных систем, 2017. – 16 с.
4. Радько Н.М. Проникновения в операционную среду компьютера: модели злоумышленного удалённого доступа: учеб. пособие [Электронный ресурс]. – Электрон. текстовые, граф. данные (1,62 Мб) / Н.М. Радько, Ю.К. Язов, Н.Н. Корнеева. – Воронеж: ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», 2013. – 265 с.
5. Советов Б.Я. Моделирование систем: учеб. для вузов / Б.Я. Советов, С.А. Яковлев. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 2001. – 343 с.
6. Мараховский В.Б. Моделирование параллельных процессов. Сети Петри / В.Б. Мараховский, Л.Я. Розенблюм, А.В. Яковлев. – СПб.: Профессиональная литература, 2014. – 400 с.
7. Ломазова И.А. Вложенные сети Петри: моделирование и анализ распределённых систем с объектной структурой / И.А. Ломазова. – М.: Научный Мир, 2004. – 208 с.
8. Тихонов В.И. Марковские процессы / В.И. Тихонов, М.А. Миронов. – М.: Сов. Радио, 1977. – 488 с.
9. Венцель Е.С. Теория вероятностей / Е.С. Венцель. – М.: Наука, 1969. – 576 с.
10. Математическая модель оценки эффективности систем защиты информации с использованием преобразования Лапласа и численного метода Гивенса / И.Г. Дровникова [и др.] // Труды СПИИРАН. № 3 (52) (2017). – С.-Пб.: СПИИРАН, 2017. – 2017. – № 3(52). – С. 234-258. – DOI 10.15622/sp.52.
11. Руководящий документ. Концепция защиты средств вычислительной техники и автоматизированных систем от несанкционированного доступа к информации. Утв. решением Гостехкомиссии Российской Федерации от 30.03.1992.
12. Goldberg D.E. Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning / D.E. Goldberg. — Massachusetts: Addison-Wesley, 1989.
13. Mitchell M. An Introduction to Genetic Algorithms / M. Mitchell. — Cambridge: MIT Press, 1999. — 158 p.

References:

1. Doktrina informatsionnoy bezopasnosti Rossiyskoy Federatsii. Utv. Ukazom Prezidenta Rossiyskoy Federatsii № 646 ot 05.12.2016. [The information security doctrine of the Russian Federation. Approved by the decree of the President of the Russian Federation No. 646 from 05.12.2016. (In Russ)]
2. Metody i sredstva evolyutsionnogo modelirovaniya pri obosnovanii trebovaniy k programmnyim sistemam zashchity informatsii: monografiya / A.A. Zmeyev [i dr.]; pod red. prof. Ye.A. Rogozina. – Voronezh: Voronezhskiy institut MVD Rossii, 2015. – 98 s. [Methods and tools of evolutionary modeling in support of requirements for software systems of information protection: monograph / A.A. Zmeyev [and others]; under the editorship of Professor E.A. Rogozin. – Voronezh: Voronezh Institute of MIA Russia, 2015. – 98 p. (In Russ)]
3. Tipovaya sistema zashchity informatsii ot nesanktsionirovannogo dostupa RU.48957919.501410-0231 // Tekhnicheskaya dokumentatsiya. – Gosudarstvennyy nauchno-issledovatel'skiy institut modelirovaniya intellektual'nykh slozhnykh sistem, 2017. – 16 s. [A typical system of information protection from unauthorized access EN.48957919.501410-02 31 // Technical documentation. – State scientific-research Institute of intelligent simulation of complex systems, 2017. – 16 p. (In Russ)]
4. Rad'ko N.M. Proniknoveniya v operatsionnuyu sredu komp'yutera: modeli zloumyshlennogo uda-lonnogo dostupa: ucheb. posobiye [Elektronnyy resurs]. – Elektron. tekstovyye, graf. dannyye (1,62 Mb) / N.M. Rad'ko, YU.K.

- YAzov, N.N. Korneyeva. – Voronezh: FGBOU VPO «Voronezhskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet», 2013. – 265 s. [Radko N.M. Penetration into the operating environment of the computer: model malicious remote access: proc. Handbook [Electronic resource]. – Electron. text, count. data (1.62 MB) / N.M. Radko, Yu.K. Yazov, N.N. Korneyeva. – Voronezh: FGBOU VPO «Voronezh state technical university», 2013. – 265 p. (In Russ)]
5. . Sovetov B.YA. Modelirovaniye sistem: ucheb. dlya vuzov / B.YA. Sovetov, S.A. Yakovlev. – 3-ye izd., pererab. i dop. – M.: Vyssh. shk., 2001. – 343 s. [Sovetov B.Y. Modelling of systems: proc. for universities / B.Y. Sovetov, S.A. Yakovlev. – 3rd d. rev. and extra. – M.: Higher. wk., 2001. – 343 p. (In Russ)]
6. Marakhovskiy V.B. Modelirovaniye parallel'nykh protsessov. Seti Petri / V.B. Marakhovskiy, L.YA. Rosenblyum, A.V. Yakovlev. – SPb.: Professional'naya literatura, 2014. – 400 s. [Marakhovsky V.B. Modeling of parallel processes. Petri nets / V.B. Marakhovsky, L.Y. Rosenblum, A.V. Yakovlev. – SPb.: Professional literature, 2014. – 400 p. (In Russ)]
7. Lomazova I.A. Vlozhennyye seti Petri: modelirovaniye i analiz raspredelennykh sistem s ob"-yektnoy strukturoy / I.A. Lomazova. – M.: Nauchnyy Mir, 2004. – 208 s. [Lomazova I.A. Nested Petri nets: modeling and analysis of distributed systems with object structure / I.A. Lomazova. – M.: Scientific World, 2004. – 208 p. (In Russ)]
8. Tikhonov V.I. Markovskiye protsessy / V.I. Tikhonov, M.A. Mironov. – M.: Sov. Radio, 1977. – 488 s. [Tikhonov V.I. Markov processes / V.I. Tikhonov, M.A. Mironov. – M.: Ows. Radio, 1977. – 488 p. (In Russ)]
9. Ventsel' Ye.S. Teoriya veroyatnostey / Ye.S. Ventsel'. – M.: Nauka, 1969. – 576 s. [Ventsel E.S. Probability theory / E.S. Wenzel. – M.: Nauka, 1969. – 576 p. (In Russ)]
10. Matematicheskaya model' otsenki effektivnosti sistem zashchity informatsii s ispol'zovaniyem preobrazovaniya Laplasy i chislennogo metoda Givensa / I.G. Drovnikova [i dr.] // Trudy SPIIRAN. № 3 (52) (2017). – S.-Pb.: SPIIRAN, 2017. – 2017. – № 3(52). – S. 234-258. – DOI 10.15622/sp.52. [Mathematical model of evaluation of the effectiveness of information security systems using the Laplace transform and the numerical method Givens / I.G. Drovnikova [and others] // Proceedings of SPIIRAS. № 3 (52) (2017). – S.-Pb.: SPIIRAS, 2017. – 2017. – № 3(52). – P. 234-258. – DOI 10.15622/sp.52. (In Russ)]
11. Rukovodyashchiy dokument. Kontseptsiya zashchity sredstv vychislitel'noy tekhniki i avtomatiziro-vannykh sistem ot nesanktsionirovannogo dostupa k informatsii. Utv. resheniyem Gostekhkommisii Rossii-skoy Federatsii ot 30.03.1992. [Guidance document. The concept of protection of computer equipment and automated systems from unauthorized access to information. Approved by the decision of gostekhkommisii of the Russian Federation from 30.03.1992. (In Russ)]
12. Goldberg D.E. Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning / D.E. Goldberg. — Massachusetts: Addison-Wesley, 1989. [Goldberg D.E. Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning / D.E. Goldberg. — Massachusetts: Addison-Wesley, 1989.
13. Mitchell M. An Introduction to Genetic Algorithms / M. Mitchell. — Cambridge: MIT Press, 1999. — 158 p.

Сведения об авторах:

Дровникова Ирина Григорьевна – доктор технических наук, доцент, профессор, кафедра автоматизированных информационных систем органов внутренних дел.

Змеев Анатолий Анатольевич – соискатель кафедры № 12.

Рогозин Евгений Алексеевич – доктор технических наук, профессор, профессор, кафедра автоматизированных информационных систем органов внутренних дел

Information about the authors:

Irina G. Drovnikova – Dr. Sci. (Technical), Prof., Department of Automated Information Systems of Internal Affairs.

Anatoly A. Zmeev - Applicant, Department № 12.

Evgeny A. Rogozin - Dr. Sci. (Technical), Prof., Department of Automated Information Systems of Internal Affairs.

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 07.07.2018.

Принята в печать 10.09.2018.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 07.07.2018.

Accepted for publication 10.09.2018.

Для цитирования: Мирземагомедова М.М., Мурадов М.М. Программное приложение для расчета модели прогнозирования инновационного развития отраслей. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2018;45 (3):123-133. DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-3-123-133

For citation: Mirzemaгомедова М.М., Muradov М.М. Software application for calculating models forecasting innovative development of industries. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2018;45 (3):123-133. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-3-123-133

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 004

DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-3-123-133

ПРОГРАММНОЕ ПРИЛОЖЕНИЕ ДЛЯ РАСЧЕТА МОДЕЛИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ИННОВАЦИОННОГО РАЗВИТИЯ ОТРАСЛЕЙ

Мирземагомедова М.М., Мурадов М.М.

^{1,2}Дагестанский государственный технический университет,

^{1,2}367026, г. Махачкала, пр. Имама Шамиля, 70, Россия,

¹e-mail: muradovam72@yandex.ru, ²e-mail: Muradovm70@mail.ru

Резюме. Цель. Статья посвящена разработке программного приложения, позволяющего автоматизировать методы сбора и обработки информации, а также выполнять трудоемкие аналитические вычисления. Для реализации программного приложения использован визуальный объектно-ориентированный язык программирования Embarcadero C++ Builder XE. Разрабатываемое программное обеспечение создается для решения следующих задач: сравнительный анализ показателей инновационного развития по выбранным годам; выбор прогнозируемого показателя, построение регрессионной модели; составление прогноза с периодом упреждения равным 3; определение доверительного интервала; формирование графического отображения наблюдаемых и расчетных значений, выбранного показателя инновационного развития. **Метод.** В программном приложении в качестве математической модели использовались формализованные методы, одним из которых является множественная регрессия. Регрессионный анализ заключается в определении аналитического выражения связи, в которой изменение одной величины, называемой зависимой или результативным признаком, обусловлено влиянием одной или нескольких независимых величин (факторов). **Результат.** С помощью разработанного программного продукта можно не только автоматизировать трудоемкие методы сбора и обработки информации, но и выполнять сложные аналитические вычисления с использованием метода множественной регрессии. **Вывод.** Embarcadero C++ Builder XE - это на сегодняшний день последняя современная технология и среда для программирования на языке C++. С помощью C++ Builder XE стало быстрее выполнять работу по созданию высококачественных приложений для Windows-приложений, за счет быстрого написания кода, новых инструментов и компонентов.

Ключевые слова: программное приложение, методы прогнозирования, метод множественной регрессии, визуальный объектно-ориентированный язык программирования Embarcadero C++ Builder XE

TECHNICAL SCIENCE
COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT

SOFTWARE APPLICATION FOR CALCULATING MODELS
FORECASTING INNOVATIVE DEVELOPMENT OF INDUSTRIES

Madina M. Mirzemagomedova¹, Marat M. Muradov²

^{1,2}Daghestan State Technical University,

^{1,2}70 I. Shamil Ave., Makhachkala 367026, Russia,

¹e-mail: muradovam72@yandex.ru, ²e-mail: Muradovm70@mail.ru

Abstract. Objectives The article is devoted to the development of a software application that allows you to automate methods for collecting and processing information, as well as perform time-consuming analytical calculations. Embarcadero C ++ Builder XE, a visual object-oriented programming language, was used to implement a software application. The software being developed is created to solve the following tasks: a comparative analysis of innovative development indicators for the selected years; selection of a projected indicator, building a regression model; making a forecast with a lead time of 3; determination of the confidence interval; the formation of a graphical display of observable and calculated values, the selected indicator of innovative development. **Method.** In a software application, formalized methods were used as a mathematical model, one of which is multiple regression. Regression analysis consists in defining an analytical expression of a relationship in which a change in a single quantity, called a dependent or productive attribute, is due to the influence of one or several independent quantities (factors). **Result.** With the help of the developed software product, you can not only automate time-consuming methods of collecting and processing information, but also perform complex analytical calculations using the multiple regression method. **Conclusion.** Embarcadero C ++ Builder XE is by far the latest state-of-the-art technology and C ++ programming environment. With C ++ Builder, XE has become faster to do the job of creating high-quality applications for Windows-based applications, due to the rapid writing of code, new tools and components.

Keywords: software application, forecasting methods, multiple regression method, visual object-oriented programming language Embarcadero C ++ Builder XE

Введение. Среди инструментов государственного регулирования экономики в условиях рынка все большее значение приобретает прогнозирование социально-экономического развития регионов на основе инновационной деятельности отраслей народного хозяйства. Такой подход оказывает существенное влияние на содержание целей и задач региональной политики, формы и методы стратегического планирования и управления. С помощью ЭВМ можно не только автоматизировать трудоемкие аналитические вычисления, но и улучшить методы сбора и обработки информации как основы организационного управления, вследствие чего автоматизированные системы все в большей мере стали играть роль фактора, во многом определяющего эффективность управления экономикой.

Постановка задачи. Разрабатываемое программное обеспечение создается для решения следующих задач: сравнительный анализ показателей инновационного развития по выбранным годам; выбор прогнозируемого показателя, построение регрессионной модели; составление прогноза с периодом упреждения равным 3; определение доверительного интервала; формирование графического отображения наблюдаемых и расчетных значений, выбранного показателя инновационного развития.

Методы исследования. В программном приложении в качестве математической модели будем использовать формализованные методы, одним из которых является множественная регрессия. Регрессионный анализ заключается в определении аналитического выражения связи, в которой изменение одной величины, называемой зависимой или результативным признаком, обусловлено влиянием одной или нескольких независимых величин (факторов).

Программное приложение реализовано на ЭВМ IBM совместимой – процессор Intel Pentium Core i3; RAM – 4GB, HDD – 500 GB. Для реализации программного приложения использован визуальный объектно-ориентированный язык программирования Embarcadero C++ Builder XE. База данных информационной системы спроектирована при помощи встроенного инструмента компании Borland DataBaseDeskTop платформа Paradox 7. Программное приложение корректно функционирует в ОС Windows 7/10.

Информационное обеспечение программного приложения представляет собой информационные файлы (входные, справочные, промежуточные, результатные), созданные для таблиц баз данных. Структуры таблиц баз данных, составляющих базу данных прогнозирования инновационного развития отраслей народного хозяйства России, представлены в таблицах 1-5.

Таблица 1. Структура таблицы базы данных «Показатели инновационного развития отраслей народного хозяйства России» [pokazatel.db]

Table 1. The structure of the database table "Indicators of innovative development of the sectors of the national economy of Russia" [pokazatel.db]

№	Наименование	назначение	тип	размерность
1	P1	Код показателя	+	
2	Name	Наименование показателя	A	50
3	Name_full	Полное название с указанием дополнительной информации	M	20
4	Name_file	Наименование файла с данными по показателю	A	9

Таблица 2. Структура таблицы базы данных «Показатель» [файлы pok1.db..pok25.db]

Table 2. The structure of the database table "Indicator" [files pok1.db..pok25.db]

№	Наименование	назначение	тип	размерность
1	Nn	Порядковый номер введенного значения	+	
2	Year1	Отчетный период (год)	S	
3	Znac	Значение показателя	N	

Таблица 3. Структура таблицы базы данных «Значения показателей, подготовленных для анализа и прогнозирования» [znacenie.db]

Table 3. The structure of the database table "Values of indicators prepared for analysis and forecasting" [znacenie.db]

№	Наименование	назначение	тип	размерность
1	Nn	Порядковый номер введенного значения	+	
2	P1	Код показателя	S	
3	Year	Отчетный год	S	
4	Zatr	Значение затрат	N	
5	Ob	Значение объема выпускаемой продукции	N	
6	Delta1	Абсолютный прирост затрат на технологические инновации	N	
7	Delta2	Абсолютный прирост объема выпускаемой продукции	N	
8	Tau1	Относительное отклонение затрат на технологические инновации	N	
9	Tau2	Относительное отклонение объема выпускаемой продукции	N	

Таблица 4. Структура таблицы базы данных «Временной ряд» [vremryad.db]
Table 4. The structure of the time series database table [vremryad.db]

№	Наименование	назначение	тип	размерность
1	X	Значение факторного показателя	S	
2	Y	Значение результатного показателя	N	

Таблица 5 Структура таблицы базы данных «Расчетные значения показателя инновационного развития» [grafik.db]

Table 5 The structure of the database table “Estimated values of the innovation development indicator” [grafik.db]

№	Наименование	назначение	тип	размерность
2	X	Значение факторного показателя	S	
3	Y1	Расчетное значение	N	

Центральным модулем программы является модуль-форма **Form 1** с кодом, хранящимся в программе unit1.cpp.

Данный модуль предназначен для открытия таблиц баз данных (компоненты **TTable**, **TDataSource**), просмотра данных за прошедшие периоды (компоненты **TNavigator**, **TComboBox**, **TLabel**, **TEdit**), вызов других модулей (компоненты **TButton**, **TBitbtn**. Здесь же разместим световое меню расположенное в верхней строке формы (компонента **TMainMenu**). В нем разместим следующие пункты «Данные», «Анализ», «Справка» и пункт «Выход» (рис.1).

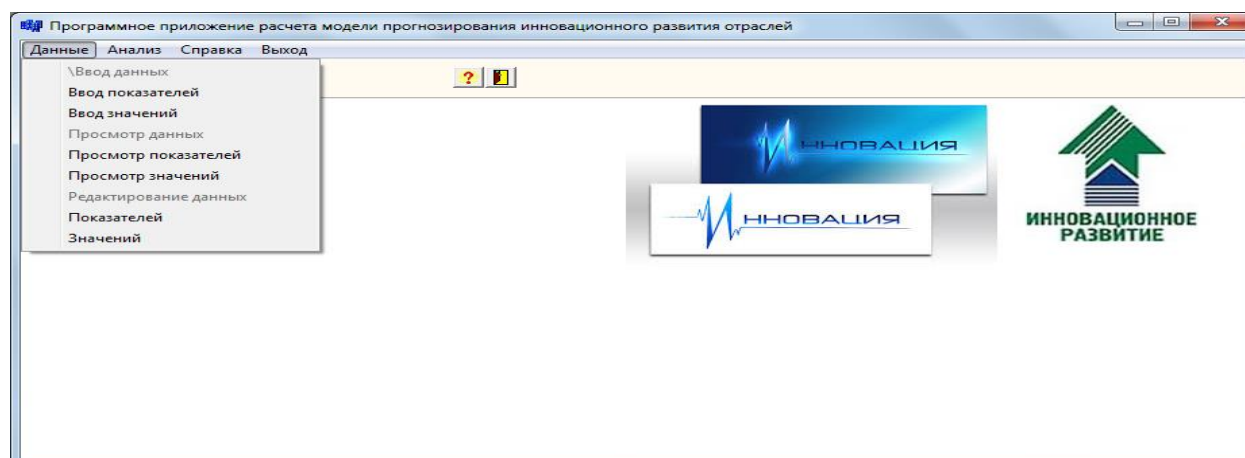


Рис.1. Проектирование формы Form 1

Fig.1. Designing a Form 1 Form

Приложение выполняет следующие функции:

1. Сравнительный анализ показателей инновационного развития по выбранным годам.
2. Выбор прогнозируемого показателя, построение регрессионной модели.
3. Составление прогноза с периодом упреждения равным 3, определение доверительного интервала.
4. Формирование графического отображения наблюдаемых и расчетных значений, выбранного показателя инновационного развития.

Программное приложение имеет модульную структуру – каждый модуль выполняет определенную функцию. Всего разработано 13 модулей.

Схема взаимосвязи программных модулей представлена на рис.2.

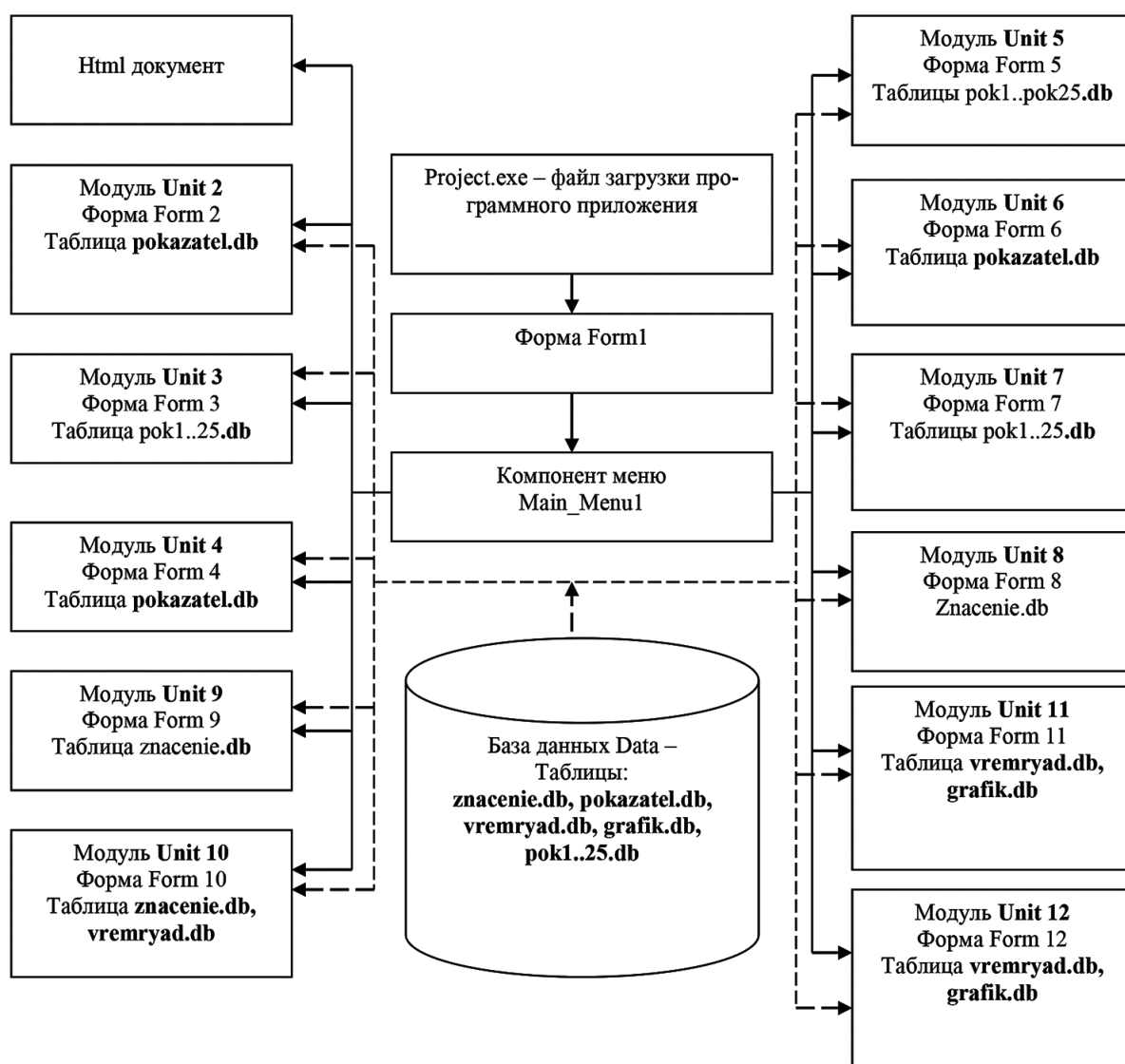


Рис. 2. Схема взаимосвязи программных модулей и информационных файлов
Fig. 2. Scheme of interrelation of program modules and information files

Для запуска программы необходимо активировать ярлык “Innovacia”, расположенный на рабочем столе. После запуска программы на экране компьютера откроется главное окно программы, в верхней строке которого расположено меню. Под ним расположена инструментальная панель с быстрыми кнопками, которые дублируют основные команды меню

Главное меню программы состоит из четырех пунктов (см. рис.1):

- Данные;
- Анализ;
- Справка;
- Выход.

По пунктам меню можно перемещаться клавишами «стрелка» или используя «мышь». Выбор пункта осуществляется клавишами «ВВОД» («ENTER») или щелчком мыши на соответствующем пункте. Панель быстрых кнопок расположена под меню. Каждая кнопка имеет рисунок, который определяет ее назначение. Для определения быстрой кнопки достаточно задержать курсор мыши над кнопкой: над кнопкой появится текст определяющий назначение кнопки.

Для ввода данных выбирается пункт «Данные» - «Ввод данных» - «Показатели».

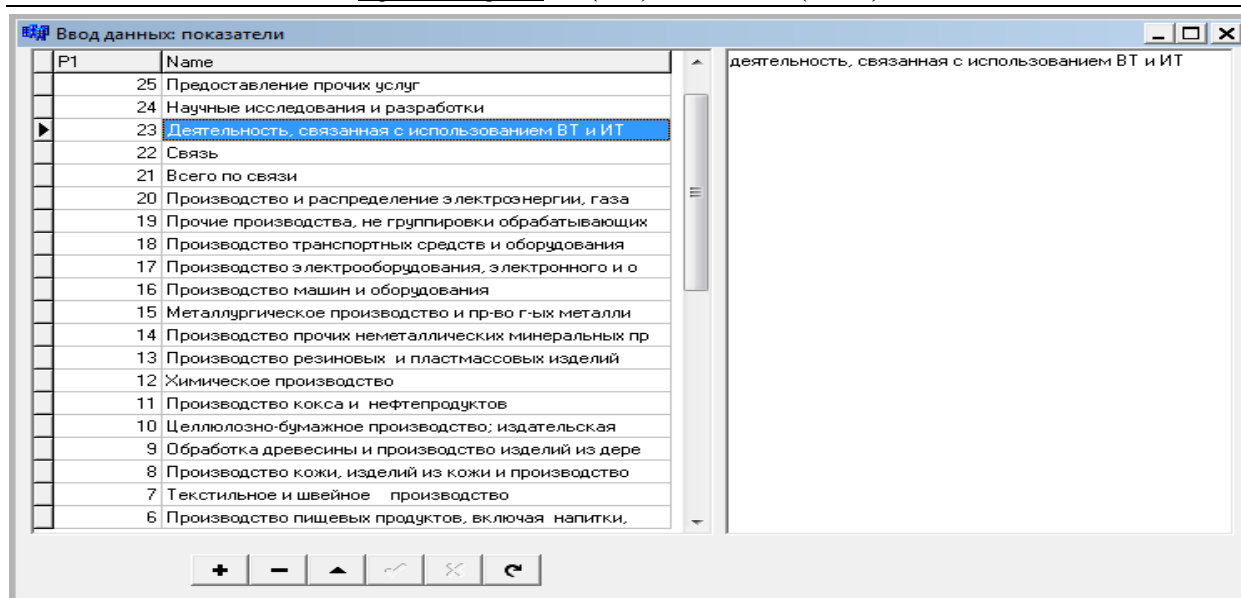


Рис.3. Ввод показателя инновационного развития отраслей народного хозяйства России

Fig.3. Enter the indicator of innovative development of the sectors of the national economy of Russia

Окно снабжено набором кнопок, позволяющих добавить новое значение показателя. Фиксация осуществляется после ввода новой строки. Аналогично производится ввод данных значений выбранного показателя (рис.3,4).

N° п.п.	Код показ.	Год	Затраты, млн.руб.	Объем прод. млн.руб.
196	6	2013	29974,3	127817,4
197	7	2013	668,5	3699
198	8	2013	190,5	570,4
199	9	2013	860,9	7562,4
200	10	2013	12149,1	18767,2
201	11	2013	193705,1	710827
202	12	2013	67166,6	160977,3
203	13	2013	7872,1	40295,2
204	14	2013	7883,7	39777,3
205	15	2013	61597,9	264827,2
206	16	2013	14642,7	68797
207	17	2013	47502,8	118139,5
208	18	2013	97520	816997,6
209	19	2013	38382,1	139563,4
210	20	2013	72136,2	30702,2
211	21	2013	365651	435335,2
212	22	2013	45550	31535,7
213	23	2013	20583,4	39558,7
214	24	2013	289457	344650,1
215	25	2013	10060,6	19590,8

Рис.4. Окно ввода показателей

Fig.4. Input window

Для проведения сравнительного анализа изменения значений показателей технологических инноваций используется пункт меню «Анализ»-«Сравнительный анализ». Данное действие приводит к открытию окна формирования аналитической таблицы. Пользователь вводит сравниваемые года (рис.5).

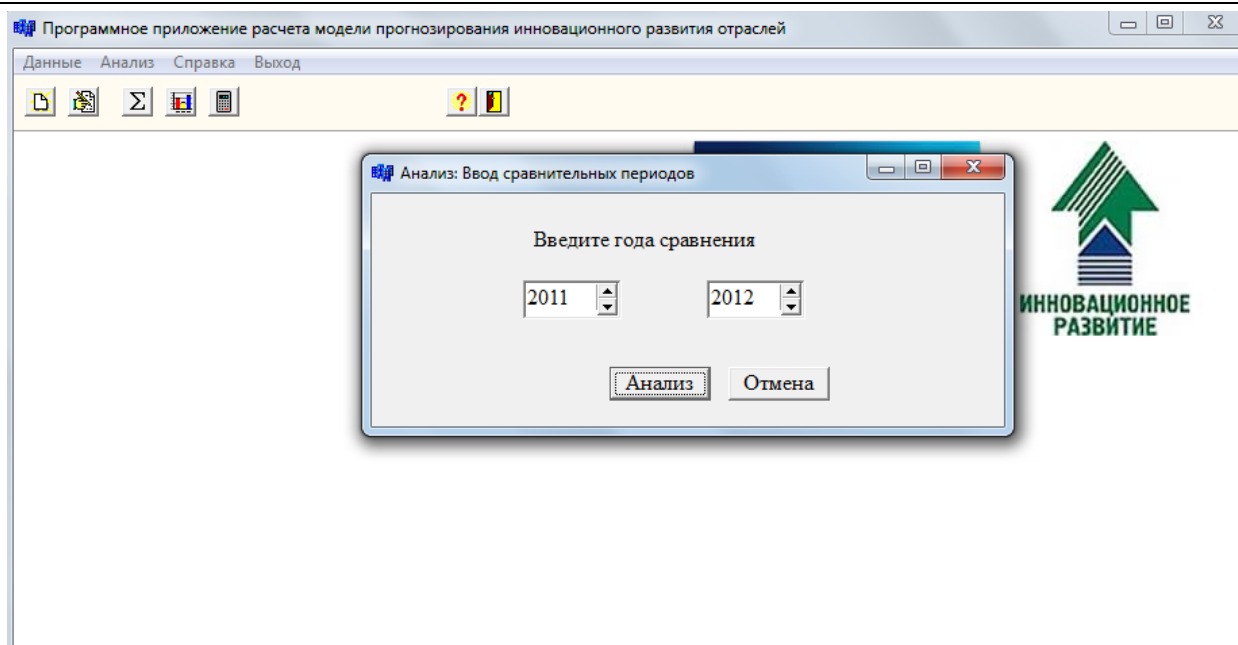


Рис.5. Окно подготовки статистического анализа
Fig.5. The window of preparation of statistical analysis

После ввода отчетных годов, нажатием кнопки «Анализ» формируется таблица с данными по двум введенным годам. В таблице приводятся данные как по абсолютным значениям, так по абсолютным и относительным изменениям показателей (рис.6).

Анализ: Отображение полученных значений													
		2011						2012					
		Затраты на инновацию	Объем продукции (ОП)	Абсолютный прирост		Относ. прирост		Затраты на инновацию	Объем продукции (ОП)	Абсолютный прирост		Относ. прирост	
				затрат	объема прод.	Затрат	ОП.			затрат	объема прод.	Затрат	ОП.
№	Наименование показателя	млн.руб.	млн.руб.	млн.руб.	млн.руб.	%	%	млн.руб.	млн.руб.	млн.руб.	млн.руб.	Таб.	%
5	Обрабатывающие производства	370006	1309228,6	130889	130889	54,7	32,2	430459,6	1973535,6	60453,6	60453,6	16,3	50,7
6	Производство пищевых продуктов, включая напитки	12562,9	116139,1	1725,2	1725,2	15,9	-1,4	16908	113182,7	4345,1	4345,1	34,6	-2,5
7	Текстильное и швейное производство	731,4	2996,1	105,5	105,5	16,9	-20,9	856	2973,9	124,6	124,6	17	-0,7
8	Производство кожи, изделий из кожи и производство изделий из кожи	38,1	531,5	0	0	0	-22,6	31,3	470	-6,8	-6,8	-17,8	-11,6
9	Обработка древесины и производство изделий из дерева	1962,2	2546,8	1482,4	1482,4	309	-4,6	1204,5	4676,6	-757,7	-757,7	-38,6	83,6
10	Целлюлозно-бумажное производство; издательская деятельность в области печати	8493,4	31252,3	5702,1	5702,1	204,3	57,7	12715	26170,7	4221,6	4221,6	49,7	-16,3
11	Производство кокса и нефтепродуктов	86891,6	93082,1	53231,5	53231,5	16,7	-17,3	103052,2	431537,3	17160,6	17160,6	20	363,6
12	Химическое производство	30738,7	156757,3	3464,7	3464,7	12,7	24,2	41594	165100,9	10795,3	10795,3	35,1	5,3
13	Производство резиновых и пластмассовых изделий	7793	31746	4282,3	4282,3	122	58,3	4847	44603,6	-2946	-2946	-37,8	40,5
14	Производство прочих неметаллических минеральных продуктов	20582,3	21659,1	15674	15674	319,3	29,1	13413,7	27049,7	-7188,6	-7188,6	-34,8	24,9
15	Металлургическое производство и производство готовых металлических изделий	92942,6	232940,9	10238,3	10238,3	12,4	59	89895,9	221281,5	-3046,7	-3046,7	-3,3	-5
16	Производство машин и оборудования	11740,9	58384,1	512,1	512,1	4,6	23,5	12280,5	62289,4	539,6	539,6	4,6	6,7
17	Производство электрооборудования, электронного и оптического оборудования	27293,3	87661,4	9345,3	9345,3	52,1	17	39545,5	102206,8	12252,2	12252,2	44,9	16,6
18	Производство транспортных средств и оборудования	41293,3	398495	10391,8	10391,8	33,6	55,1	61723,6	663061,1	20430,3	20430,3	49,5	66,4
19	Прочие производства, не группировки обрабатывающих производств	27941,9	74993	14733,4	14733,4	111,5	66,8	32452,6	108931,5	4510,7	4510,7	16,1	45,3
20	Производство и распределение электроэнергии, газа и тепла	29196,9	21362,1	-759,2	-759,2	-2,5	-9,3	65425,7	13177,9	36228,8	36228,8	124,1	-38,3
21	Всего по сектору	264373,7	259370,3	0	0	0	0	320900,3	363300,8	56526,6	56526,6	21,4	40,1
22	Связь	130211,3	49486,6	0	0	0	0	75842,6	41444,1	-54368,7	-54368,7	-41,8	-16,3
23	Деятельность, связанная с использованием ВТ и ИТ	7542,7	24951,2	0	0	0	0	7388,1	14648,1	-154,6	-154,6	-2	-41,3
24	Научные исследования и разработки	116525,5	159410	0	0	0	0	226779,5	283957,3	110254	110254	94,6	78,1
25	Предоставление прочих услуг	10094,3	25622,6	0	0	0	0	10890,1	23251,3	795,8	795,8	7,9	-8,9

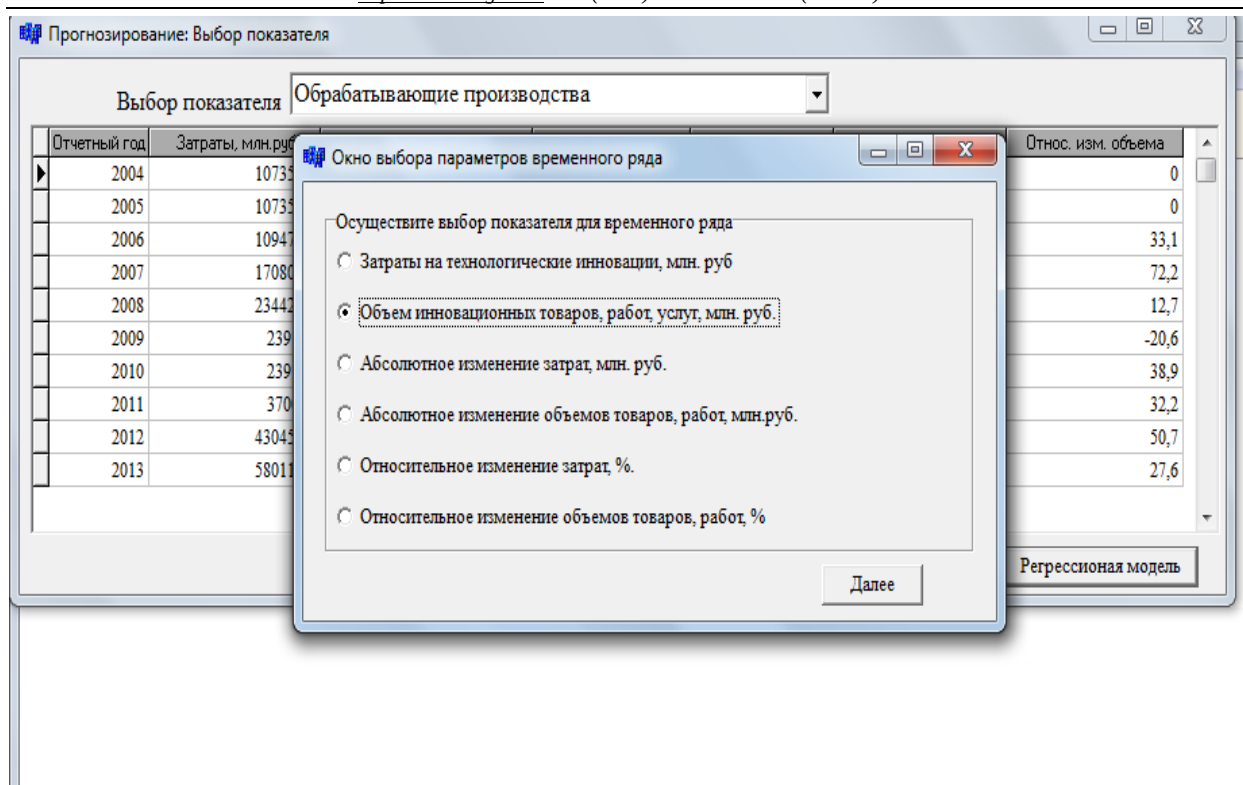


Рис.7. Диалоговое окно «Выбор анализируемого показателя»

Fig.7. Dialog box "Select the analyzed indicator"

Выбрав один из параметров необходимо нажать кнопку «Далее», что приводит к открытию окна расчета коэффициентов уравнения регрессии. По графику наблюдаемых данных можно выбрать тип уравнения тренда, после чего нажать на кнопку «Построить линию тренда». Это действие рассчитывает коэффициенты уравнения регрессии, расчетные и наблюдаемые значения отображаются в виде графика, точечный график соответствуют наблюдениям, линия расчетным значениям (рис.8). Для получения прогнозных оценок используется кнопка «Прогнозирование» (рис.9).

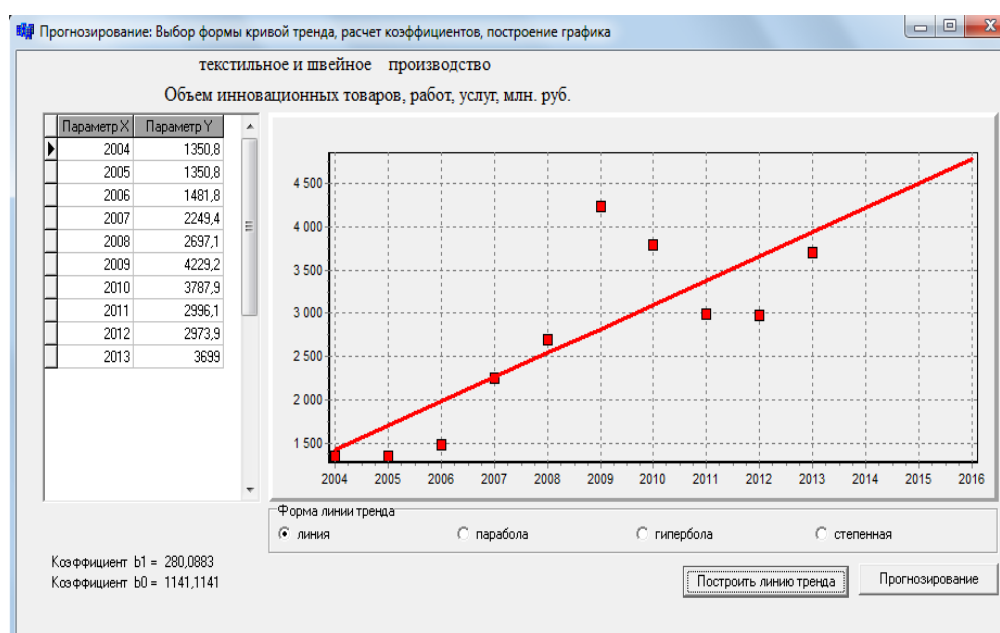


Рис. 8. Окно «Выбора линии тренда»

Fig. 8. "Trend Line Selection" window

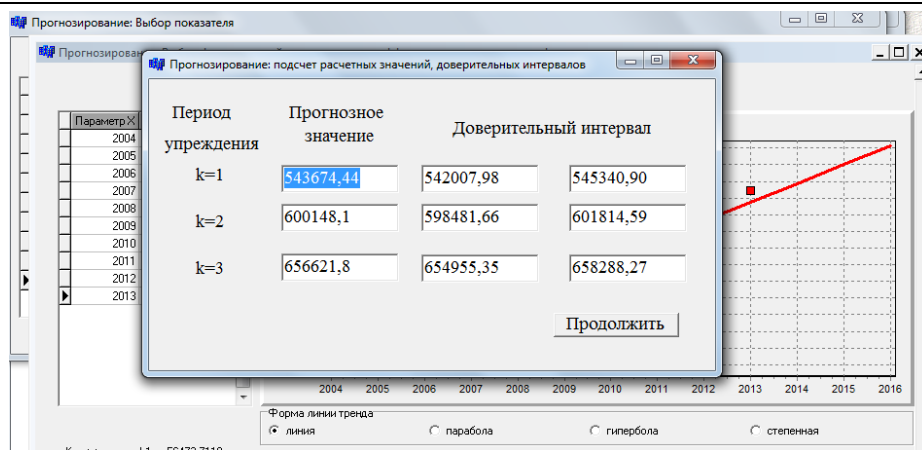


Рис.9. Окно отображения прогнозных оценок

Fig.9. Predictive Ratings Display Window

Для завершения работы с приложением выбирается пункт меню «Выход».

Обсуждение результатов. С помощью разработанного программного продукта можно не только автоматизировать трудоемкие методы сбора и обработки информации, но и выполнять сложные аналитические вычисления с использованием метода множественной регрессии.

Вывод. Embarcadero C++Builder XE - это на сегодняшний день последняя современная технология и среда для программирования на языке C++. С помощью C++Builder XE стало быстрее выполнять работу по созданию высококачественных приложений для Windows-приложений, за счет быстрого написания кода, новых инструментов и компонентов.

Библиографический список:

1. Мурадов М.М. Сфиева Д.К., Мирземагомедова М.М. Автоматизированная система учета и оценки научной работы кафедры вуза. Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки. – 2015.- Вып.№ 1(30). – С.30-34.
2. Мурадов М.М. Сфиева Д.К., Мирземагомедова М.М, Ибрагимов А.Д. Разработка информационной системы по учету научной активности сотрудников кафедры. Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки. – 2015.- Вып.№2 (31).- С.65 – 71.
3. Мурадов М.М., Даудова Т.Н. Программное приложение для расчета сбалансированного рациона питания на предприятиях общественного питания. Гос. регистрация программы для ЭВМ № 2013619305 опубли. 20.12.2013. 1 с.
4. Архангельский А.Я. Программирование в C++ Builder. М.- Издательство «Бином», 2010 г.
5. Диго С.М. Проектирование и использование баз данных. М.- Издательство «Финансы и статистика», 2004 г.
6. As'ad Mahmoud Alnaser , Omar AlHeyasat , Ashraf Abdel-Karim Abu-Ein, Hazem (Moh'd Said) Hatamleh , Ahmed A. M. Sharadqeh. Time Comparing between Java and C++ Software. Journal of Software Engineering and Applications, 2012, 5, 630-633
7. Augie David Manuputty, Agustinus Fritz Wijaya. Information System/Information Technology Strategic Planning in Order Information Technology Development Strategy Using TOGAF (The Open Group Architecture Framework) Methodology in Achieving World Class University in Satya Wacana Christian University. Intelligent Information Management, 2013, 5, 175-181.
8. Chandra S. Amaravadi. Office Information Systems: A Retrospective and a Call to Arms. Journal of Software Engineering and Applications, 2014, 7, 700-712.
9. June Luo. Statistical Application in Economics. Open Journal of Statistics, 2012, 2, 120-123.
10. Pantelis G. Bagos, Maria Adam. On the Covariance of Regression Coefficients.- Open Journal of Statistics Vol.5 No.7
11. Robert Winter Construction of Situational Information Systems Management Methods. International Journal of Information System Modeling and Design, 3(4), 67-85
12. Абдулгалимов А. М. Методология статистического анализа и прогнозирования социально-экономических и экологических процессов в Республике Дагестан : Дис. ... д-ра экон. наук : 08.00.11 : Москва, 2000 336 с.
13. Айвазян С.А., Мхитарян В.С. Прикладная статистика и основы эконометрики. В 2 томах. - М.: ЮНИТИ, 2001.
14. Айвазян С.А., Мхитарян В.С. Прикладная статистика в задачах и упражнениях. М.: ЮНИТИ, 2001.
15. Анализ данных : учебник для академического бакалавриата / В. С. Мхитарян [и др.] ; под ред. В. С. Мхитаряна. — М. : Издательство Юрайт, 2016.
16. Афанасьев В.Н. Развитие системы методов статистического исследования временных рядов. Вестник НГУЭУ, 2012, № 1 С.10-24

17. Владимиров О.Н. Проблемы и перспективы инновационного развития организаций и предприятий сферы услуг. *Фундаментальные исследования*. – 2014. – № 6-6. – С. 1247-1252.
18. Дубров А.М., Мхитарян В.С., Трошин Л.И. Многомерные статистические методы. М.: Финансы и статистика, 2000.
19. Дубров А. М., Мхитарян В.С., Л. И. Трошин. Математическая статистика (для бизнесменов и менеджеров). М.: МЭСИ, 2000.

References:

1. Muradov M.M. Sfiyeva D.K., Mirzemagomedova M.M. Avtomatizirovannaya sistema ucheta i otsenki nauchnoy raboty kafedry vuza. *Izvestiya Dagestanskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universite-ta. Yestestvennyye i tochnyye nauki*. – 2015.- Vyp.№ №1(30). – S.30-34. [Muradov M.M. Sfiyeva D.K., Mirzemagomedova M.M. Automated system of accounting and evaluation of scientific work of the department of the university. *Proceedings of the Dagestan State Pedagogical University. Natural and exact sciences*. - 2015.- Issue number 1 (30). - C.30-34. (In Russ)]
2. Muradov M.M. Sfiyeva D.K., Mirzemagomedova M.M, Ibragimov A.D. Razrabotka informatsionnoy si-stemy po uchetu nauchnoy aktivnosti sotrudnikov kafedry. *Izvestiya Dagestanskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta. Yestestvennyye i tochnyye nauki*. – 2015.- Vyp.№2 (31).- S.65 – 71. [Muradov M.M. Sfiyeva D.K., Mirzemamedova M.M., Ibragimov A.D. Development of an information system to account for the scientific activity of the department staff. *Proceedings of the Dagestan State Pedagogical University. Natural and exact sciences*. - 2015.- Issue number 2 (31) .- P.65 - 71. (In Russ)]
3. Muradov M.M., Daudova T.N. Programmnoye prilozheniye dlya rascheta sbalansirovannogo ratsiona pitaniya na predpriyatiyakh obshchestvennogo pitaniya. Gos. registratsiya programmy dlya EVM № 2013619305 opubl. 20.12.2013. 1 s. [Muradov MM, Daudova T.N. Software application for the calculation of a balanced diet in catering. State computer software registration number 2013619305 publ. 12/20/2013. 1 sec. (In Russ)]
4. Arkhangel'skiy A.YA. Programmirovaniye v S++ Builder. M.- Izdatel'stvo «Binom», 2010 g [Arkhangelsk A.Ya. Programming in C ++ Builder. M.- Publishing House "Binom", 2010(In Russ)]
5. Digo S.M. Proyektirovaniye i ispol'zovaniye baz dannykh. M.- Izdatel'stvo «Finansy i statistika», 2004 g. [Digo S.M. Design and use of databases. M.- Publishing house "Finance and Statistics", 2004(In Russ)]
6. As'ad Mahmoud Alnaser, Omar AlHeyasat, Ashraf Abdel-Karim Abu-Ein, Hazem (Moh'd Said) Hatamleh, Ahmed A. M. Sharadqeh. Time Comparing between Java and C ++ Software. *Journal of Software Engineering and Applications*, 2012, 5, 630-633
7. Augie David Manuputty, Agustinus Fritz Wijaya Information Method Development Strategy (TLAF) The World-wide University in Satya Wacana Christian University. *Intelligent Information Management*, 2013, 5, 175-181.
8. Chandra S. Amaravadi. Office Information Systems: A Retrospective and a Call to Arms. *Journal of Software Engineering and Applications*, 2014, 7, 700-712.
9. June Luo. Statistical Application in Economics. *Open Journal of Statistics*, 2012, 2, 120-123.
10. Pantelis G. Bagos, Maria Adam. On the Covariance of Regression Coefficients.- *Open Journal of Statistics Vol.5 No.7*
11. Robert Winter Construction of Situational Information Systems Management Methods. *International Journal of Information Systems Modeling and Design*, 3 (4), 67-85
12. Abdulgalimov A. M. Metodologiya statisticheskogo analiza i prognozirovaniya sotsial'no-ekonomicheskikh i ekologicheskikh protsessov v Respublike Dagestan : Dis. ... d-ra ekon. nauk : 08.00.11 : Moskva, 2000 336 s. [Abdulgalimov A.M. Methodology of statistical analysis and forecasting of socio-economic and ecological processes in the Republic of Dagestan: Dis. ... Dr. Econ. Sciences: 08.00.11: Moscow, 2000 336 p. (In Russ)]
13. Ayvazyan S A., Mkhitarayan B.C. Prikladnaya statistika i osnovy ekonometriki. V 2 tomakh. - M.: YUNITI, 2001. [Ayvazyan S A., Mkhitarayan B.C. Applied statistics and basics of econometrics. In 2 volumes. - M.: UNITI, 2001. (In Russ)]
14. Ayvazyan S.A., Mkhitarayan B.C. Prikladnaya statistika v zadachakh i uprazhneniyakh. M.: YUNITI, 2001. [Ayvazyan S.A., Mkhitarayan B.C. Applied statistics in tasks and exercises. M.: UNITI, 2001. (In Russ)]
15. Analiz dannykh : uchebnik dlya akademicheskogo bakalavriata / V. S. Mkhitarayan [i dr.] ; pod red. V. S. Mkhitarayana. — M. : Izdatel'stvo Yurayt, 2016. [Data analysis: a textbook for academic bachelor / V.S. Mkhitarayan [et al.]; by ed. V.S. Mkhitarayan. - M.: Publishing Yurayt, 2016. (In Russ)]
16. Afanas'yev V.N. Razvitiye sistemy metodov statisticheskogo issledovaniya vremennykh ryadov. *Vestnik NGUEU*, 2012, № 1 S.10-24 [Afanas'yev V.N. The development of a system of methods for statistical study of time series. *Herald of NSUEA*, 2012, № 1, p.10-24(In Russ)]
17. Vladimirova O.N. Problemy i perspektivy innovatsionnogo razvitiya organizatsiy i predpriyatiy sfery uslug. *Fundamental'nyye issledovaniya*. – 2014. – № 6-6. – S. 1247-1252. [Vladimirova O.N. Problems and prospects of innovative development of organizations and service enterprises. *Basic research*. - 2014. - № 6-6. - p. 1247-1252. (In Russ)]
18. Dubrov A.M., Mkhitarayan B.C., Troshin L.I. Mnogomernyye statisticheskiye metody. M.: Finansy i sta-tistika, 2000. [Dubrov A.M., Mkhitarayan B.C., Troshin L.I. Multidimensional statistical methods. M.: Finance and Statistics, 2000. (In Russ)]

19. Dubrov A. M., Mkhitarian B.C., Ji. I. Troshin. Matematicheskaya statistika (dlya biznesmenov i mene-dzherov). M.: MESI, 2000. [Dubrov A.M., Mkhitarian B.C., Ji. I. Troshin. Mathematical statistics (for businessmen and mene-jerov). M .: MESI, 2000. (In Russ)]

Сведения об авторах:

Мирземагомедова Мадина Миязуллаховна - кандидат технических наук, доцент, кафедра «Прикладная математика и информатика».

Мурадов Марат Миязуллахович - кандидат экономических наук, доцент, кафедра «Информационные технологии и прикладная информатика в экономике».

Information about authors:

Madina M. Mirzemagomedova - Cand. Sci. (Technical), Assoc. Prof., Department of Applied Mathematics and Computer Science.

Marat M. Muradov - Cand. Sci. (Economics), Assoc. Prof., Department Information Technologies and Applied Informatics in Economics.

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 07.06.2018.

Принята в печать 20.09.2018.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 07.06.2018.

Accepted for publication 20.09.2018

Для цитирования: Абакаров А.Д., Зайнулабидова Х.Р. Сейсмическая реакция нелинейной системы сейсмозащиты с кинематическими опорами. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2018;45 (3):134-144. DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-3-134-144

For citation: Abakarov A.D., Zajnulabidova H.R. Seismic reaction of nonlinear system of seismic defense with kinematic supports. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2018; 45 (3):134-144. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-3-134-144

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

УДК 699 841

DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-3-134-144

СЕЙСМИЧЕСКАЯ РЕАКЦИЯ НЕЛИНЕЙНОЙ СИСТЕМЫ СЕЙСМОЗАЩИТЫ С КИНЕМАТИЧЕСКИМИ ОПОРАМИ

Абакаров А.Д.¹, Зайнулабидова Х.Р.²

^{1,2}Дагестанский государственный технический университет,

^{1,2}367026, г. Махачкала, пр. И. Шамиля, 70, Россия,

¹e-mail:abakarov@bk.ru, ²e-mail:hanzada1@mail.ru

Резюме. Цель. Целью исследования является получение формул расчёта вероятностных характеристик сейсмической реакции нелинейной системы сейсмоизоляции с заданной функцией «Сила-перемещение», характерной для системы сейсмоизоляции с кинематическими опорами, и оценка эффективности данной системы сейсмоизоляции в многоэтажных зданиях. **Метод.** Исследования проведены аналитическими методами и численным методом статистических испытаний. **Результат.** Получены аналитические выражения для расчёта среднеквадратического значения перемещения одномассовой системы сейсмоизоляции с кинематическими опорами и графики эффективности применения кинематических опор для сейсмоизоляции многоэтажных зданий, составленные по результатам численных экспериментов методом статистических испытаний. **Вывод.** Применение кинематических опор, с зависимостью «Сила-перемещение», описываемой заданной в работе нелинейной функцией, позволяет снизить сейсмические нагрузки на здания и перекосы этажей в 2 и более раза. Кинематические фундаменты более эффективны при высокочастотных воздействиях и в зданиях конструктивного решения высотой не более 5 этажей.

Ключевые слова: система сейсмоизоляции, кинематические опоры, упруго-нелинейная зависимость «Сила-перемещение», дифференциальное уравнение движения, уравнение Колмагорова, сейсмическая реакция одномассовой системы сейсмоизоляции, многоэтажные здания с кинематическими фундаментами, нестационарный случайный процесс, метод статистических испытаний, сейсмические нагрузки, перекосы этажей

TECHNICAL SCIENCE
BUILDING AND ARCHITECTURE
SEISMIC REACTION OF NONLINEAR SYSTEM OF SEISMIC DEFENSE WITH
KINEMATIC SUPPORTS

Abacar D. Abakarov¹, Hanzada R. Zajnulabidova²

^{1,2}Daghestan State Technical University,

^{1,2}70 I. Shamilya Ave., Makhachkala, 367026, Russia,

¹e-mail:abakarov@bk.ru, ²e-mail:hanzada1@mail.ru

Abstract Objectives. The aim of the study is to obtain formulae for calculating probability of seismic response characteristics of nonlinear seismic isolation system with the specified function "force-shifting", characteristic of seismic isolation system with kinematic pillars and score the effectiveness of this system of seismic isolation in multi-storey buildings. **Method.** The studies were performed analytical techniques and numerical method of statistical tests. **Result.** Analytical expressions to calculate the mean square value of onemassive seismic isolation system with displacement kinematic pillars and the effectiveness of the application of graphs of kinematic seismic isolation bearings for multi-storey buildings based on the results of numerical experiments using the method of statistical tests. **Conclusion.** Application of kinematic supports, with "power-move" described by the specified in the work of a non-linear function, allows you to reduce the seismic loads on buildings and distortions of floors 2 or more times. Kinematic bases are more effective when high-frequency effects and in the buildings of the constructive solution of a height of not more than 5 floors.

Keywords: seismic isolation system, kinematic supports, elastic-nonlinear dependence "force-shifting", differential equation of motion, Kolmagorova equation, seismic response of one massive seismic isolation systems, mezzanine buildings with foundations, kinematic Nonstationary random process, a method of statistical tests, seismic loads, distortions of floors

Введение. Специальные системы сейсмозащиты зданий, основанные на принципах адаптации, сейсмоизоляции, энергопоглощения, гашения колебаний и приспособляемости находят широкое применение во многих странах. Они отличаются большей эффективностью и надежностью в отличие от систем, основанных на традиционных подходах к обеспечению сейсмостойкости. Вопросам сейсмозащиты и сейсмоизоляции зданий и сооружений посвящена обширная литература отечественных и зарубежных специалистов, основополагающими из которых являются [1-16].

Одним их эффективных методов сейсмоизоляции зданий является обеспечение податливости надземной части здания относительно подземной части установкой между ними кинематических (качающихся) опор [10-16]. Кинематические опоры приводят к упруго-нелинейным колебаниям сооружения, где график «Сила-перемещение» чаще всего имеет плавную восходящую и нисходящую ветви [4, 19, 20]. Нисходящая ветвь связана с крутящим моментом, передаваемым весом здания на опоры в процессе их качения. Кинематические опоры широкое практическое применение, на наш взгляд, не находят в связи с отсутствием должного обоснования их эффективности при разных ситуациях, связанных с параметрами сейсмического воздействия и самих опор.

Постановка задачи. Рассматривается система сейсмоизоляции, зависимость "R-y" которой может быть аппроксимирована нелинейной функцией следующего вида:

$$R(y) = C_0 \cdot y \cdot (1 - \rho \cdot y^2) \quad (1)$$

Здесь C_0 определяет наклон кривой в начальной точке 0, а ρ является параметром нелинейности. При $\rho=0$ функция (1) становится линейной. Значения параметров C_0 и ρ следует найти по экспериментально полученной зависимости "R-y" для рассматриваемых кинематических фундаментов. Кривые, описываемые функцией (1), имеют плавный выпуклый характер с восходящей и нисходящей ветвями. На рис. 1 приведены графики функции (1) при $\rho=0,025$; 0,05 и 0,1.

Путём подбора C_0 и ρ функция (1) может описать экспериментальные зависимости в широких пределах.

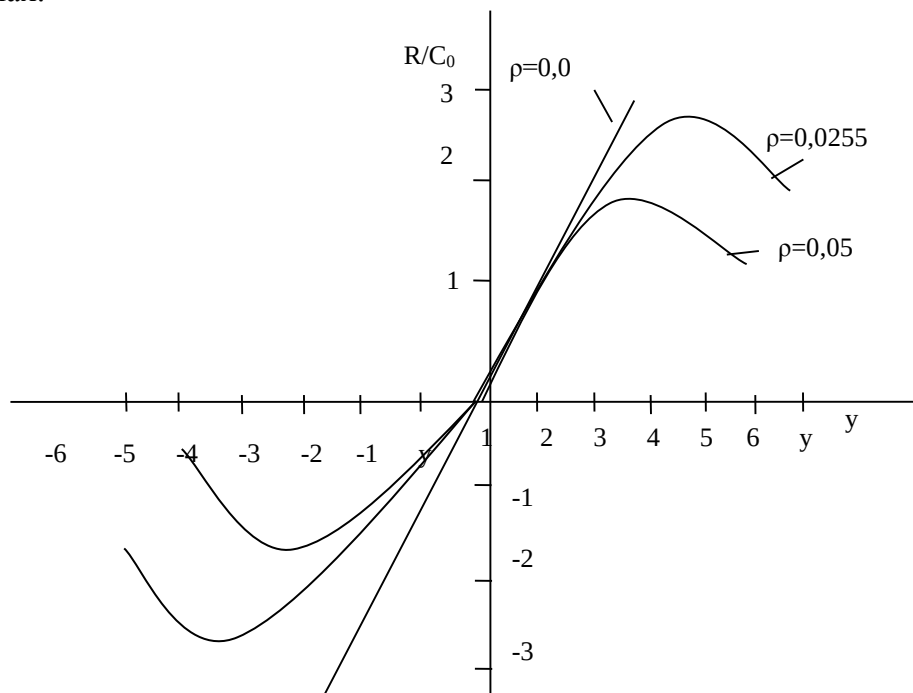


Рис.1. Нелинейная зависимость «R-y» для системы с кинематическими опорами

Fig.1. Non-linear dependence «R-y» for a system with kinematic supports

Дифференциальное уравнение колебаний одномассовой системы с рассматриваемой нелинейно-упругой зависимостью имеет вид:

$$\ddot{y}(t) + 2 \cdot \varepsilon \cdot \dot{y}(t) + \omega_0^2 \cdot y(t) \cdot (1 - \rho \cdot y^2(t)) = -\ddot{y}_{ep}(t), \quad (2)$$

здесь $\omega_0^2 = \sqrt{C_0/m}$.

Сейсмические колебания грунтов моделируем "белым шумом" со спектральной плотностью S_0 .

Методы исследования. Решение (2) будем искать с помощью уравнения Колмогорова [17, 18]. Для этого представим (2) в виде системы двух уравнений первого порядка, полагая $\dot{y} = y_1$, $y = y_2$;

$$\begin{cases} \dot{y}_1 + 2 \cdot \varepsilon \cdot y_1 + \omega_0^2 \cdot y_2 - \rho \cdot \omega_0^2 \cdot y_2^3 = -\ddot{y}_{ep}(t) \\ \dot{y}_2 - y_1 = 0 \end{cases} \quad (3)$$

Обозначим через $P=P(y_1, y_2)$ совместную плотность вероятностей y_1 и y_2 .

Тогда второе уравнение Колмогорова, соответствующее стационарному решению, имеет вид:

$$y_1 \frac{\partial P}{\partial y_2} - 2 \cdot \varepsilon \cdot P - 2 \cdot \varepsilon \cdot y_1 \frac{\partial P}{\partial y_1} - (\omega_0^2 \cdot y_2 - \rho \cdot \omega_0^2 \cdot y_2^3) \frac{\partial P}{\partial y_1} - \frac{S_0}{2} \frac{\partial^2 P}{\partial y_1^2} = 0 \quad (4)$$

Представим (4) в виде:

$$\frac{\partial}{\partial y_1} \left[(\omega_0^2 \cdot y_2 - \rho \cdot \omega_0^2 \cdot y_2^3) \cdot \rho + \frac{S_0}{4 \cdot \varepsilon} \frac{\partial}{\partial y_2} \right] + \left(-\frac{\partial}{\partial y_2} + 2 \cdot \varepsilon \frac{\partial}{\partial y_1} \right) \cdot \left(P \cdot y_1 + \frac{S_0}{4 \cdot \varepsilon} \frac{\partial}{\partial y_1} \right) = 0 \quad (5)$$

Приняв плотность вероятности $P(y_1, y_2)$ в виде произведения $P_1(y_1) \cdot P_2(y_2)$, получим:

$$\frac{\partial}{\partial y_1} \left\{ P_1 \cdot \left[(\omega_0^2 \cdot y_2 - \rho \cdot \omega_0^2 \cdot y_2^3) \cdot P_2 + \frac{S_0}{4 \cdot \varepsilon} \frac{\partial P_2}{\partial y_2} \right] \right\} + \left(-\frac{\partial}{\partial y_2} - 2 \cdot \varepsilon \frac{\partial}{\partial y_1} \right) \cdot \left[P_2 \cdot \left(P_1 \cdot y_1 + \frac{S_0}{4 \cdot \varepsilon} \frac{\partial P_1}{\partial y_1} \right) \right] = 0 \quad (6)$$

Для обращения (6) в тождество необходимо, чтобы функции P_1 и P_2 удовлетворяли уравнениям:

$$\begin{aligned} \frac{\partial P_2}{\partial y_2} + \frac{(\omega_0^2 \cdot y_2 - \rho \cdot \omega_0^2 \cdot y_2^3) \cdot 4 \cdot \varepsilon}{S_0} \cdot P_2 &= 0 \\ \frac{\partial P_1}{\partial y_1} + \frac{4 \cdot \varepsilon}{S_0} \cdot y_1 \cdot P_1 &= 0 \end{aligned}$$

Решая их, получим:

$$P_1 = C_1 \cdot \exp\left(-\frac{4 \cdot \varepsilon}{2 \cdot S_0} \cdot y_1^2\right), \quad (7)$$

$$P_2 = C_2 \cdot \exp\left(-\frac{4 \cdot \varepsilon}{2 \cdot S_0} \cdot \omega_0^2 \cdot y_2^2\right) \cdot \exp\left(\rho \cdot \omega_0^2 \cdot \frac{4 \cdot \varepsilon}{2 \cdot S_0} \cdot y_2^4\right), \quad (8)$$

Произвольные постоянные C_1 и C_2 находим из условий:

$$\int_{-\infty}^{\infty} P_1(y_1) dy_1 = 1; \quad \int_{-\infty}^{\infty} P_2(y_2) dy_2 = 1.$$

Для C_1 имеем

$$C_1 = \sqrt{2 \cdot \frac{\varepsilon}{\pi \cdot S_0}}, \quad (9)$$

Дисперсию скорости системы находим в виде:

$$\sigma_{y'}^2 = C_1 \cdot \int_{-\infty}^{\infty} y_1^2 \cdot P_1(y_1) dy_1 \quad (10)$$

Подставив (8) и (9) в (10), получим:

$$\sigma_{y'}^2 = \frac{S_0}{4} \cdot \varepsilon.$$

Дисперсию перемещения системы находим так:

$$\sigma_{y''}^2 = C_2 \cdot \int_{-\infty}^{\infty} y_2^2 \cdot P_2(y_2) dy_2, \quad (11)$$

Для получения замкнутого решения, P_2 представим в виде:

$$P_2 = C_2 \cdot e^{-a \cdot \omega_0^2 \cdot y_2^2} \left[1 + \frac{a \cdot p \cdot \omega_0^2 \cdot y_2^4}{2} + \frac{1}{2} \left(\frac{a \cdot p \cdot \omega_0^2}{2} \right)^2 \cdot y_2^8 + \dots \right], \quad (12)$$

где $a = 2 \cdot \varepsilon / S_0$.

Произвольную постоянную C_2 определяем из условия:

$$C_2 \int_{-\infty}^{\infty} e^{-a \cdot \omega_0^2 \cdot y_2^2} \cdot \left[1 + \frac{a \cdot p \cdot \omega_0^2 \cdot y_2^4}{2} + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{a \cdot p \cdot \omega_0^2}{2} \right)^2 \cdot y_2^8 \right] dy_2 = 1. \quad (13)$$

Интегрируя (13) с применением таблицы интегралов [21], и после некоторых преобразований, получим:

$$C_2 = \frac{\omega_0^5 \cdot a^{5/2}}{\left(\sqrt{\pi \cdot \omega_0^4 \cdot a^2 + 0.625 \cdot \omega_0^2 \cdot a \cdot p + 1.46 \cdot p^2} \right)} \quad (14)$$

Интегрируя (11) с учётом (12), будем иметь:

$$\sigma_{y''}^2 = C_2 \cdot \int_{-\infty}^{\infty} y_2^2 \cdot e^{-a \cdot \omega_0^2 \cdot y_2^2} \cdot \left[1 + \frac{a \cdot p \cdot \omega_0^2 \cdot y_2^4}{2} + \frac{1}{2} \left(\frac{a \cdot p \cdot \omega_0^2}{2} \right)^2 \cdot y_2^8 \right] dy_2 = C_2 \cdot \left[\frac{1}{(\omega_0 \cdot \sqrt{a})^3} \cdot \Gamma(3/2) + \right. \\ \left. \frac{a \cdot p \cdot \omega_0^2}{2 \cdot (\omega_0 \cdot \sqrt{a})^7} \cdot \Gamma(7/2) + \frac{a \cdot p \cdot \omega_0^2}{2} \cdot \frac{1}{(\omega_0 \cdot \sqrt{a})^{11}} \cdot \Gamma(11/2) \right]$$

Учитывая, что $\Gamma(3/2)=0,8862$, $\Gamma(7/2)=3,3232$, $\Gamma(11/2)=52,34$ и после некоторых преобразований, получим:

$$\sigma_{y''}^2 = C_2 \cdot \frac{1}{(\omega_0 \cdot \sqrt{a})^3} \cdot \left[0.8862 + 1.6616 \cdot \frac{p}{\omega_0 \cdot a} + 6.5426 \cdot \frac{p^2}{\omega_0^4 \cdot a^2} \right], \quad (15)$$

Подставив в (15) выражение для C_2 из (14), находим:

$$\sigma_{y''}^2 = \sigma_{y_0}^2 \cdot \frac{1.772 \cdot \omega_0^2 \cdot a^2 + 3.32 \cdot \omega_0^2 \cdot a \cdot p + 13.08 \cdot p^2}{1.772 \cdot \omega_0^2 \cdot a^2 + 0.625 \cdot \omega_0^2 \cdot a \cdot p + 1.46 \cdot p^2}, \quad (16)$$

где $\sigma_{y''}^2 = S_0 / (4 \cdot \varepsilon \cdot \omega_0^2)$ - среднеквадратическое значение перемещения системы

$\sigma_y = \sqrt{\sigma_{y''}^2}$, а среднее из максимальных - $\ddot{y} \approx 3 \cdot \sigma_y$.

На рис. 2 приведены зависимости σ_y от ρ и $T_0 = 2 \cdot \pi / \omega_0$ при величине спектральной плотности сейсмического воздействия $S_0 = 300 \text{ см/с}^3$.

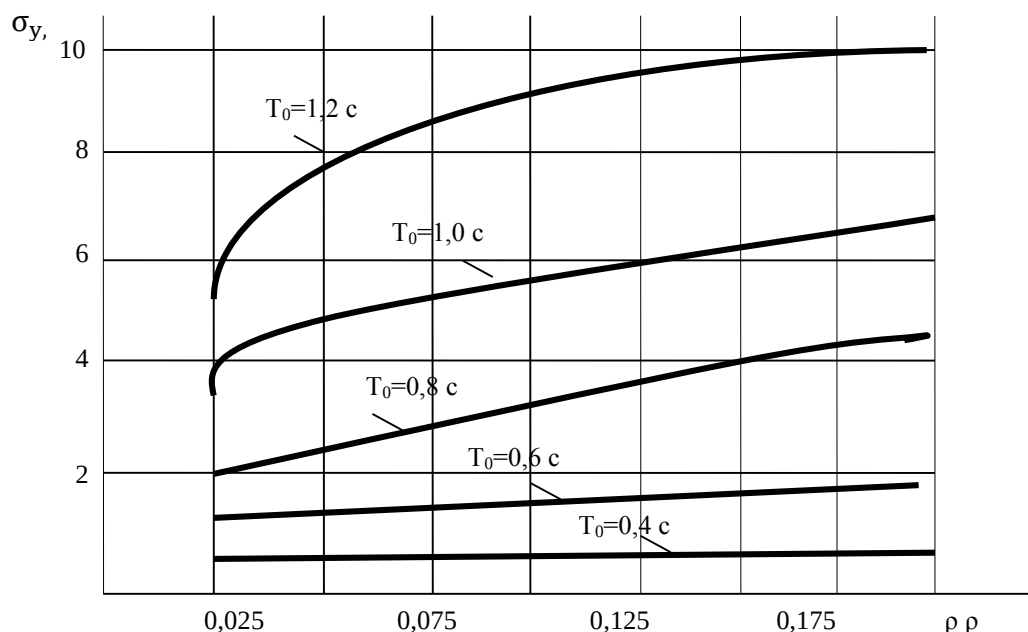


Рис. 2. Зависимость среднеквадратической величины перемещения системы от периода T_0 и коэффициента ρ

Fig.2. Dependence of the rms value of the displacement of the system from the period T_0 and the coefficient ρ

Выражение (16) может быть применено при оценке надёжности зданий с кинематическими опорами, моделируемых в виде одномассовой системы.

Для многоэтажных зданий с кинематическими опорами, моделируемых в виде нелинейных многомассовых систем, получение аналитических выражений для расчёта вероятностной сейсмической реакции является сложной задачей.

Поэтому такие задачи следует решать методом статистических испытаний, моделируя на ЭВМ сейсмическое воздействие в виде нестационарного случайного процесса и интегрируя исходную систему дифференциальных уравнений на ЭВМ.

Вероятностные характеристики сейсмической реакции системы при этом находят путём статистической обработки полученных результатов. В данной работе с целью оценки эффективности системы сейсмоизоляции с кинематическими опорами, описываемых зависимостью "Сила-перемещение" вида (1), методом статистических испытаний исследованы 3, 5 и 9 этажные крупнопанельные здания.

Обсуждение результатов. Полученные результаты исследований приведены на рис. 3-8.

При этом через КФ-2 названы кинематические фундаменты с параметрами $C=1000$ и $\rho=0,001$, а через КФ-3 - с параметрами $C=1000$ и $\rho=0,0001$.

Графики показывают, что при расчётном ускорении колебания грунта, равном 490 см/с^2 , целесообразнее возводить 3-х этажные здания с кинематическими фундаментами, так как в этом случае величина P_0 на периодах $0,1 \div 0,4$ сек, близка к 1, с увеличением T_j до 0,5 сек – $P_0=0,8$, а при $T_j=0,6$ сек – $P_0=0,6$. Таким образом, строительство 3-х этажных зданий эффективно при $T_j=0,1 \div 0,5$ сек, 5-ти этажных при $T_j=0,1 \div 0,4$ сек, а 9-ти этажных при $T_j=0,1-0,2$ сек.

Величина перекося этажа являются важным параметром, от которого зависит надёжность каждого этажа здания, а, следовательно, зависит и надёжность здания в целом.

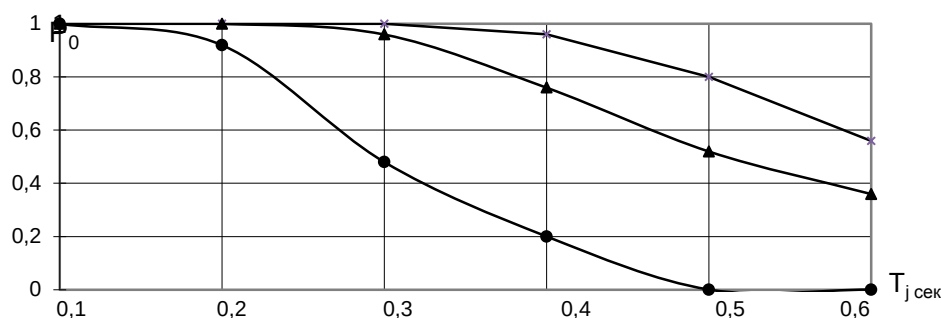


Рис. 3. Графики изменения вероятностей неперевышения P_0 нулевым уровнем здания на кинематических фундаментах типа КФ-3, заданного значения перемещения $[y_0]$, равного 30 см, при сейсмическом воздействии с расчётным ускорением колебания грунта $a_{расч} = 490 \text{ см/с}^2$ и преобладающим периодом колебаний в интервале $T_j = 0,1 \div 0,6$ сек

- ■ — трёх этажное здание
- ▲ — пяти этажное здание
- ● — девяти этажное здание

Fig.3. Graphs of changing the non-exceedance probabilities P_0 by the building zero level on kinematic foundations of type KF-3, given a displacement value $[y_0]$ of 30 cm, under seismic impact with a calculated acceleration of ground motion $a_{расч} = 490 \text{ cm/s}^2$ and the prevailing period of oscillations in the range of $T_j = 0.1 \div 0.6$ seconds

- ■ - three-storey building
- ▲ - five storey building
- ● - nine storey building

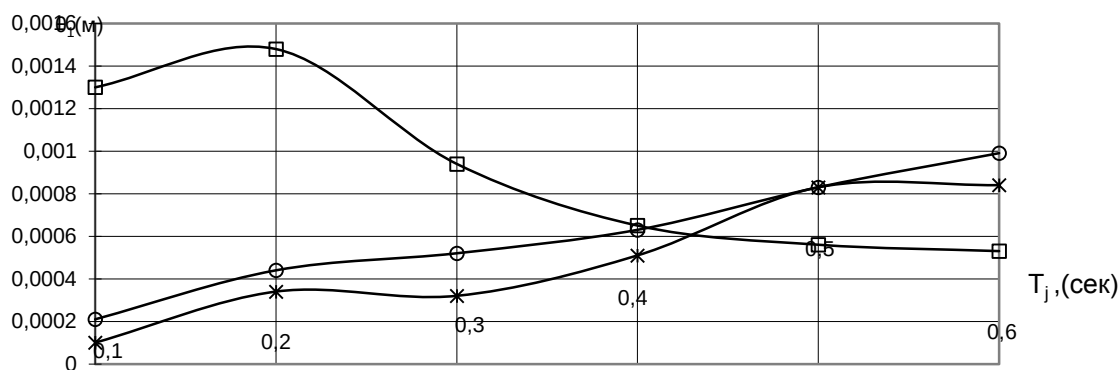


Рис.4. Графики изменения перекосов первого этажа 5-ти этажного здания в зависимости от типа фундамента при сейсмическом воздействии с параметрами $a_{расч} = 420 \text{ см/с}^2$ и $T_j = 0,1 \div 0,6$ сек

- □ — система без сейсмоизоляции
- ж — система с кинематическими фундаментами типа КФ-2
- о — система с кинематическими фундаментами типа КФ-3

Fig. 4. Graphs of changes in the distortions of the first floor of a 5-storey building, depending on the type of foundation under seismic effects with parameters $a_{расч} = 420 \text{ cm/s}^2$ and $T_j = 0.1 \div 0.6 \text{ s}$

- □ — system without seismic isolation
- ж — system with kinematic foundations of type KF-2
- о — system with kinematic foundations of type KF-3

Рис. 4 и 5 наглядно демонстрируют зависимость перекосов этажей θ от значений преобладающих периодов колебаний грунтов и типа фундамента.

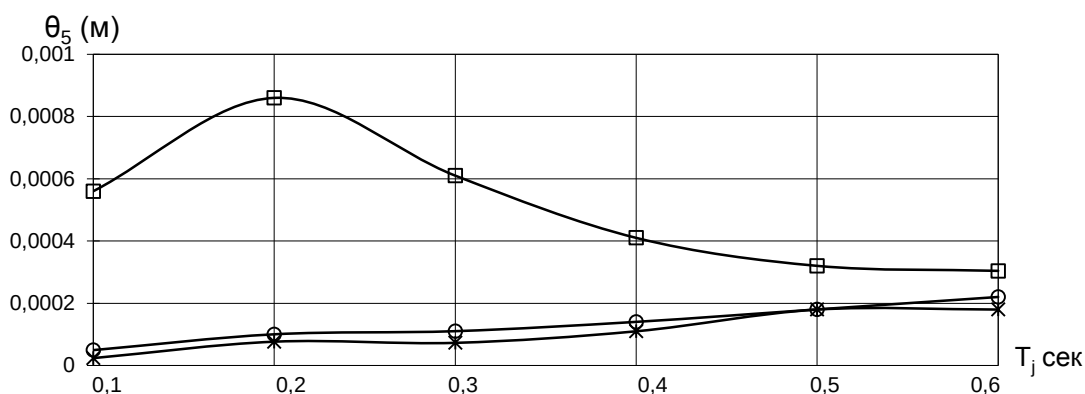


Рис. 5. Графики изменения перекосов пятого этажа 5-ти этажного здания в зависимости от типа кинематического фундамента при сейсмическом воздействии с параметрами $a_{расч}=320$ см/с² и $T_j=0,1÷0,6$ сек

- система без сейсмоизоляции
- ж— система с кинематическими фундаментами типа КФ-2
- о— система с кинематическими фундаментами типа КФ-3

Fig. 5. Graphs of changes in distortions of the fifth floor, 5-storey building, depending on the type of kinematic foundation in a seismic effect with parameters $a_{расч} = 320$ cm / s² and $T_j = 0.1 ÷ 0.6$ sec

- system without seismic isolation
- zh — system with kinematic foundations of type KF-2
- o— system with kinematic foundations of type KF-3

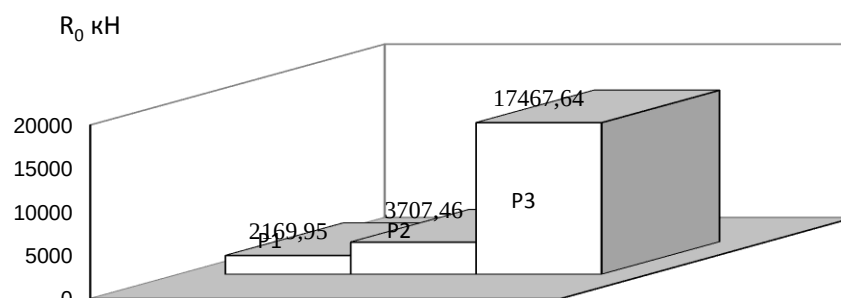


Рис. 6. Диаграммы изменения упругих реакций в уровне массы m_0 трёх этажного здания в зависимости от типа применяемых фундаментов при сейсмическом воздействии параметрами $a_{расч}=420$ см/с² и $T_j=0,1$ сек

- P1 – система с кинематическими фундаментами типа КФ-2,
- P2 – система с кинематическими фундаментами типа КФ-3,
- P3 - система без активной сейсмоизоляции

Fig. 6. Diagrams of changes in elastic reactions in the mass level m_0 of a three-story building depending on the type of foundations used under seismic action with parameters $a_{расч} = 420$ cm / s² and $T_j = 0.1$ s

- P1 - a system with kinematic foundations of the type KF-2,
- P2 - system with kinematic foundations of the type KF-3,
- P3 - system without active seismic isolation

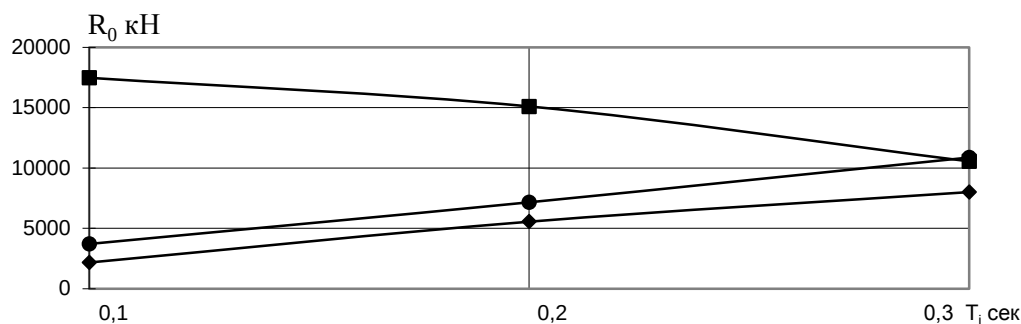


Рис.7. Графики горизонтальных сдвигающих сил, действующие на трёх этажное здание в уровне массы m_0 при сейсмическом воздействии с параметрами $a_{расч}=420 \text{ см/с}^2$ и $T_j=0,1\div0,3$ сек

- ◆— система с кинематическими фундаментами типа КФ-2,
- система с кинематическими фундаментами типа КФ-3,
- система без активной сейсмоизоляции

Fig. 7. Graphs of horizontal shear forces acting on a three-story building at the mass level m_0 under seismic effects with parameters $a_{расч} = 420 \text{ cm} / \text{s}^2$ and $T_j = 0.1 \div 0.3 \text{ s}$

- ◆—system with kinematic foundation type KF-2,
- system with kinematic foundations of the type KF-3,
- system without active seismic isolation

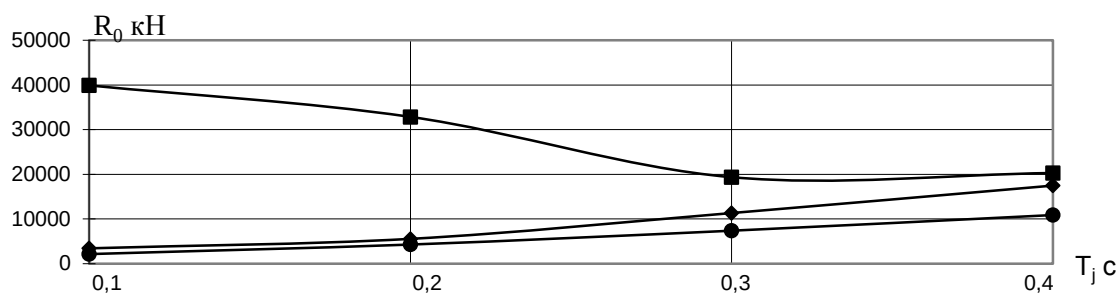


Рис. 8. Графики горизонтальных сдвигающих сил R_0 (кН) действующие на пяти этажное здание в уровне массы m_0 при сейсмическом воздействии параметрами $a_{расч}=320 \text{ см/с}^2$ и $T_j=0,1\div0,4$ сек

- ◆—система с кинематическими фундаментами типа КФ-2,
- система с кинематическими фундаментами типа КФ-3,
- система без сейсмоизоляции

Fig. 8. Graphs of horizontal shear forces R_0 (kN) acting on a five-story building at a mass level of m_0 with seismic effects with parameters $a_{расч} = 320 \text{ cm} / \text{s}^2$ and $T_j = 0.1 \div 0.4 \text{ s}$

- ◆—system with kinematic foundation type KF-2,
- system with kinematic foundation type KF-3,
- system without seismic isolation

Вышеприведённые графики показывают высокую эффективность систем сейсмоизоляции с рассматриваемыми кинематическими опорами, особенно когда количество этажей здания не превышает пяти. Здесь при высокочастотных сейсмических воздействиях сейсмические нагрузки и перекосы этажей здания снижаются в 2 и более раза.

Сейсмическая реакция системы сейсмоизоляции с кинематическими опорами, зависимость «Сила-перемещение» которых описывается нелинейной функцией с восходящей и нисходящими ветвями, параметры которой могут охватить экспериментальные зависимости для широкого круга систем с кинематическими опорами.

Дано аналитическое решение задачи оценки сейсмической реакции системы сейсмоизоляции с кинематическими опорами, моделируемой в виде одномассовой системы и приведены

результаты исследования сейсмической реакции 3, 5 и 9 массовых консольных стержней, моделирующих крупнопанельные здания с кинематическими опорами в уровне верха фундаментов.

Результаты исследований показывают высокую эффективность кинематических опор с нелинейной зависимостью «R-y» предлагаемой в данной работе.

Более эффективными данные системы сейсмоизоляции оказались при сейсмических воздействиях с преобладающими высокими частотами и количестве этажей здания, не превышающем 5.

Вывод. Предложенная нелинейная функция «Сила-перемещение» для описания экспериментально полученных результатов для системы сейсмоизоляции с кинематическими опорами охватывает широкий диапазон параметров кинематических опор и позволяет достаточно точно их аппроксимировать.

Полученное математическое выражение для определения вероятностных значений перемещений одномассовых систем на кинематических опорах может быть использовано в расчётах их надёжности.

Результаты численных экспериментов многоэтажных зданий на кинематических опорах, проведённых при сейсмическом воздействии, представленном в виде нестационарного случайного процесса, показывают высокую эффективность систем сейсмоизоляции с кинематическими опорами, движение которых описывает предлагаемая в работе аппроксимирующая функция.

Библиографический список:

1. Айзенберг, Я.М. Сооружения с выключающимися связями для сейсмических районов / Я.М. Айзенберг. – М.: Стройиздат, 1976. – 229 с.
2. Поляков, В.С. Современные методы сейсмозащиты зданий / В.С. Поляков, Н.Ш. Килимник, А.В. Черкашин. – М.: Стройиздат, 1989. – 320 с.
3. Черепинский, Ю.Д. К сейсмостойкости зданий на кинематических опорах / Основания, фундаменты и механика грунтов / Ю.Д. Черепинский. – 1972. – №3. – С.13-15
4. Черепинский, Ю.Д. Сейсмоизоляция зданий (сборник статей) / Ю.Д. Черепинский – Москва, 2009. – 358 с.
5. Савинов, О.А. Сейсмоизоляция сооружений (концепция, принципы устройства, особенности расчёта) // О.А. Савинов / Избранные статьи и доклады "Динамические проблемы строительной техники". – Санкт-Петербург, 1993. – С.155-178.
6. Уздин, А.М. Основы теории сейсмостойкости и сейсмостойкого строительства зданий и сооружений // А.М. Уздин, Т.А. Сандович, Самих Амин Аль-Насер-Мохомад. – СПб.: Изд. ВНИИГ, 1993. – 175 с.
7. Уздин, А.М. Сейсмостойкие конструкции транспортных зданий и сооружений / А.М. Уздин, С.В. Елизаров, Т.А. Белаш. – М.: ФГБОУ Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2012. – 500 с.
8. Skiner, R.I. An introduction to seismic isolation / R.I. Skiner, W.H. Robinson, G.H. McVerry. – New Zealand: John Wiley & Sons, 1993. – 353 p.
9. Kelly, J.M. Earthquake resistant design with rubber. Springer, 1997, Kelly, J.M. Earthquake resistant design with rubber. Springer / J.M. Kelly. – London: Springer - Verl., 1997. – 243 p.
10. Назин, В.В. Индустриализация строительства сооружений сейсмостойкой конструкции / В.В. Назин. – Киев: Будивельник, 1977. – 90 с.
11. Курзанов, А.В. Натурные исследования трёхэтажного фрагмента и пятиэтажного здания на сейсмоизолирующих опорах // А.В. Курзанов, А.М. Ахмедов // Эксперсс-информация ВНИИИС. Сер. 14. Сейсмостойкое строительство. 1994. – Вып. 2-3. – С. 24-32.
12. Черепинский, Ю.Д. Сейсмоизоляция жилых зданий / Ю.Д. Черепинский. – Алма-Аты, 2003. – 157 с.
13. Аубакиров, А.Т. Особенности задания сейсмического воздействия для обоснования проекта сейсмоизолирующих фундаментов / А.Т. Аубакиров // Известия ВНИИГ. – 1989. – Т. 212. – С. 102 - 109
14. Юсупов А.К. Проектирование сейсмостойких зданий на кинематических опорах / А.К. Юсупов – Махачкала: Издательство «Лотос», 2006. – 422 с.
15. Авидон Г.Э., Карлина Е.А. Особенности колебаний зданий с сейсмоизолирующими фундаментами / А.М. Курзанова и Ю.Д. Черепинского // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. №1, 2008. – С. 42–44.
16. Абакаров А.Д. Влияние параметров нелинейности на сейсмическую реакцию зданий с кинематическими опорами / А.Д. Абакаров, Х.Р. Зайнулабидова / Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. №6, 2003. – С. 35-38.
17. Тихонов, В.И. Марковские случайные процессы / В.И. Тихонов, М.А. Миронов – М.: Совет. радио, 1977. – 485 с.
18. Гусев, А.С. Расчёт конструкций при случайных воздействиях / А.С. Гусев, В.А. Светлицкий – М.: Машиностроение, 1984. – 240 с.
19. Кириков Б.А. Расчёт нелинейных систем с одной степенью свободы на интенсивные сейсмические воздействия / Б.А. Кириков – Строительная механика и расчёт сооружений. №5, 1983. С. 38-42.

20. Вибрации в технике: Справочник в 6-ти т./Ред. Совет. В.Н. Челомей (пред.) – М. Машиностроение, 1979 – т.2. Колебания нелинейных механических систем /Под. Ред. Н.Н. Блехмана. – 1979 – 351 с.
21. Двайт, Г.Б. Таблицы интегралов и другие математические формулы /Г.Б. Двайт - М.: Наука, 1977. - 224 с.

References:

1. Ayzenberg, YA.M. Sooruzheniya s vyklyuchayushchimisya svyazymi dlya seysmicheskikh rayonov / YA.M. Ayzenberg. – М.: Stroyizdat, 1976. - 229 s. [Eisenberg, J.M. Buildings with vyklyuchayushchimisya links for seismic areas /J.M. Eisenberg. - М.: Stroiizdat, 1976. - 229 p. (In Russ)]
2. Polyakov, V.S. Sovremennyye metody seysmozashchity zdaniy / V.S. Polyakov, N.SH. Kilimnik, A.V. Cherka-shin. - М.: Stroyizdat, 1989.-320 s. [Polyakov V.S. Modern methods of seismic protection of buildings /V.S Polyakov, N.SH. Kylymnyk., A.V. Cherkashin. - М.: Stroiizdat, 1989.-320 p. (In Russ)]
3. Cherepinskiy, YU.D. K seysmostoykosti zdaniy na kinemacheskikh oporakh /Osnovaniya, fundamenty i me-khanika gruntov / YU.D. Cherepinskiy. - 1972.-№3.- S.13-15 [Cherepinskiy, Y.D. The earthquake resistance of buildings on kine-matic/base supports, foundations and soil mechanic / Y.D. Cherepinskiy. -1972.-№3.- P.13-15. (In Russ)]
4. Cherepinskiy, YU.D. Seysmoizolyatsiya zdaniy (sbornik statey) / YU.D. Cherepinskiy - Moskva, 2009.-358 s. [Cherepin-skij, Y.D. seismic isolation buildings (collection of articles)/Y.D. Cherepinskiy-Moscow, 2009. - 358 p. (In Russ)]
5. Savinov, O.A. Seysmoizolyatsiya sooruzheniy (kontseptsiya, printsipy ustroystva, osobennosti raschota) //O.A. Savinov / Izbrannyye stat'i i doklady "Dinamicheskiye problemy stroitel'noy tekhniki". - Sankt-Peterburg, 1993. - S.155-178. [Savinov, O.A. Seismic isolation structures (concept, principles, especially calculation devices)//O.A. Savinov /Featured articles and reports "Dynamic problems of construction machinery". -St. Petersburg, 1993. - P. 155-178. (In Russ)]
6. Uzdin, A.M. Osnovy teorii seysmostoykosti i seysmostoykogo stroitel'stva zdaniy i sooruzheniy // A.M. Uzdin, T.A. Sandovich, Samikh Amin Al'-Naser-Mokhomad. -SPB.: Izd. VNIIG, 1993. - 175 s. [Uzdin, A.M. Foundations of the theory of seismic and earthquake-proof construction of buildings and structures//A.M. Uzdin, T.A. Sandovich, Amin Al-Nasser-Mohomad. -St. Petersburg: Izd. VNIIG, 1993. -175 p. (In Russ)]
7. Uzdin, A.M. Seysmostoykiye konstruksii transportnykh zdaniy i sooruzheniy / /A.M. Uzdin, S.V. Yeliza-rov, T.A. Belash. - М.: FGBOU Uchebno-metodicheskij tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transpor-te, 2012. - 500 s. [Uzdin, A.M. Earthquake resistant constructions of buildings and structures //A.M. Uzdin, S.V. Elizarov, T.A. Belash. - М.: FEDERAL training centre for education on rail safety 2012. -500 p. (In Russ)]
8. Skinner, R.I. An introduction to seismic isolation / R.I. Skinner, W.H. Robinson, G.H. McVerry.-New Zealand: John Wiley & Sons, 1993. - 353 p.
9. Kelly, J.M. Earthquake resistant design with rubber. Springer. 1997, Kelly, J.M. Earthquake resistant design with rubber. Springer / J.M. Kelly. - London: Springer - Verl., 1997. - 243 p.
10. Nazin, V.V. Industrializatsiya stroitel'stva sooruzheniy seysmostoykoy konstruksii / V.V. Nazin. - Kiyev: Budivel'nik, 1977. - 90 s. [Nazin, V. V. Industrialization of construction of earthquake-resistant structures / V. V. Nazin. - Kiev: Budiv-el'nik, 1977. - 90 p. (In Russ)]
11. Kurzanov, A.V. Naturnyye issledovaniya trokhetazhnogo fragmenta i pyatietazhnogo zdaniya na seysmoizo-liruyush-chikh oporakh // A.V. Kurzanov, A.M. Akhmedov // Eksperss-informatsiya VNIIS. Ser. 14. Seysmostoy-koye stroitel'stvo. 1994. - Vyp. 2-3. - S. 24-32. 1 [Kurzanov, A. V. Field studies of a three-story fragment and five-storey buildings with seismic isolation bearings // V. A. Kurzanov, A. M. Akhmedov // Express-information de La direction. Ser. 14. Earthquake engi-neering. 1994. - Vol. 2-3. - P. 24-32. (In Russ)]
12. Cherepinskiy, YU.D. Seysmoizolyatsiya zhilykh zdaniy / YU.D. Cherepinskiy. - Alma-Aty, 2003. -157 s. [Cherepansky J. D., seismic isolation of residential buildings / yd Cherepansky. - Alma-ATA, 2003. -157 p. (In Russ)]
13. Aubakirov, A.T. Osobennosti zadaniya seysmicheskogo vozdeystviya dlya obosnovaniya proyekta seysmoizo-liruyush-chikh fundamentov / A.T. Aubakirov // Izvestiya VNIIG. – 1989. - T. 212. - S. 102 - 109 [Aubakirov, T. A. features of setting of the seismic impact for substantiation of the project of seismic isolation foundations / A. T. Aubakirov // Izvestiya VNIIG. - 1989. - Vol. 212. - P. 102 – 109. (In Russ)]
14. Yusupov A.K. Proyektirovaniye seysmostoykikh zdaniy na kinemacheskikh oporakh /A.K. Yusupov – Makhach-kala: Izdatel'stvo «Lotos», 2006. - 422 s. [Yusupov A. K., earthquake resistant Design of buildings on kinematic supports /A. K. Yusupov – Makhachkala: Publishing house "Lotus", 2006. – 422 c. (In Russ)]
15. Avidon G.E., Karlina Ye.A. Osobennosti kolebaniy zdaniy zdaniy s seysmoizoliruyushchimi fundamenta-mi / A.M. Kurzanova i YU.D. Cherpinskogo // Seysmostoykoye stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzheniy. №1, 2008. - S. 42–44. [Avidan G. E., Carlin, E. A. Vibration Characteristics of buildings with seismic isolation Foundation / Kurzanov A. M. and J. D. Karpinskogo // Earthquake-resistant construction. Safety of structures. No. 1, 2008. C. 42-4415. Dwight, G.B. Tables of integrals and other mathematical formulas /G.B. Dwight - М.: Science, 1977. - 224 p. (In Russ)]
16. Abakarov A.D. Vliyaniye parametrov nelineynosti na seysmicheskuyu reaktsiyu zdaniy s kinemacheskimi oporami / A.D. Abakarov, KH.R. Zaynulabidova / Seysmostoykoye stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzheniy. №6, 2003. - S. 35-38. [Abakarov A. D. Influence of parameters of nonlinearity on the seismic response of buildings with kinematic supports / D. A. Abakarov, R. H. Zainalabidov / Earthquake-resistant construction. Safety of structures. No. 6, 2003. P. 35-38 (In Russ)]
17. Tikhonov, V.I. Markovskiye sluchaynyye protsessy / V.I. Tikhonov, M.A. Mironov - М.: Sovet. radio, 1977. - 485 s. [Tikhonov, V. I. Markov random processes / V. I. Tikhonov and M. A. Mironov, М.: the Council. radio, 1977. - 485 p. (In Russ)]

18. Gusev, A.S. Raschot konstruksiy pri sluchaynykh vozdeystviyakh / A.S. Gusev, V.A. Svetlitskiy - M.: Ma-shinostroyeniye, 1984. - 240 s. [Gusev, A. S. analysis of structures for random effects / A. S. Gusev, V. A. Svetlitskiy - M.: Mashinostroyeniye, 1984. - 240 p. (In Russ)]
19. Kirikov B.A. Raschot nelineynykh sistem s odnoy stepen'yu svobody na intensivnyye seysmicheskiye voz-deystviya / B.A. Kirikov – Stroitel'naya mekhanika i raschot sooruzheniy. №5, 1983. S. 38-42. [Kirikov B. A. calculation of the nonlinear systems with one degree of freedom for intensive seismic effects / B. A. Kirikov – the Building mechanics and calculation of structures. No. 5, 1983. - P. 38-42. (In Russ)]
20. Vibratsii v tekhnike: Spravochnik v 6-ti t./Red. Sovet. V.N. Chelomey (pred.) – M. Mashinostroyeniye, 1979 – t.2. Kolebaniya nelineynykh mekhanicheskikh sistem /Pod. Red. N.N. Blekhmana. – 1979 – 351 s. [Vibration in engineering: Handbook in 6 volumes/Ed. Council. V. N. Chelomey (pred.)- M. mechanical engineering, 1979-vol. 2. Oscillations of non-linear mechanical systems / Sub. Ed. N. N. Blechman. 1979. – 351 p. (In Russ)]
21. Dvayt G.B. Tablitsy integralov i drugiye matematicheskiye formuly /G.B. Dvayt - M.: Nauka, 1977. - 224 s. [Dwight H. B. Tables of integrals and other mathematical formulas /H. B. Dwight, M.: Nauka, 1977. - 224 p. (In Russ)]

Сведения об авторах:

Абакаров Абакар Джансулаевич – доктор технических наук, профессор, кафедра архитектуры.

Зайнулабидова Ханзада Рауповна – кандидат технических наук, доцент, кафедра архитектуры.

Information about the authors:

Abakar J. Abakarov – Dr. Sci. (Technical), Prof., Department of architecture.

Hanzada R. Zainalabidova – Cand. Sci. (Technical), Assoc. Prof., Department of architecture.

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 22.06.2018.

Принята в печать 26.09.2018.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 22.06.2018.

Accepted for publication 26.09.2018.

Для цитирования: Алхасова Ю.А., Гаджиев А.М., Хаджишалапов Г.Н., Хежев Т.А. Влияние предварительного электроразогрева на физико-термические характеристики жаростойкого керамзитобетона на основе композиционного вяжущего из местного минерального сырья. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2018;45 (3):145-154. DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-3-145-154

For citation: Alhasova Y.A., Gadzhiev A.M., Khadzhashalapov G.N., Hezhev T.A. The effect of preliminary electric radio heating on the physical and thermal characteristics of the heat-resistant ceramzitobeton-concrete based on compositive binder of local mineral raw materials. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2018; 45(3):145-154. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-3-145-154

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

УДК 691.34

DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-3-145-154

ВЛИЯНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРОРАЗОГРЕВА НА ФИЗИКО-ТЕРМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЖАРОСТОЙКОГО КЕРАМЗИТОБЕТОНА НА ОСНОВЕ КОМПОЗИЦИОННОГО ВЯЖУЩЕГО ИЗ МЕСТНОГО МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ

Алхасова Ю.А.³, Гаджиев А.М.⁴, Хаджишалапов Г.Н.¹, Хежев Т.А.²

^{1,3,4} Дагестанский государственный технический университет,

^{1,3,4} 367026, г. Махачкала, пр. Имама Шамиля, 70, Россия,

² Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова,

² 360004, г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173, Россия,

¹ e-mail: yarus-x@mail.ru, ² e-mail: hejev_tolya@mail.ru,

³ e-mail: Yulduz1312@yandex.ru, ⁴ e-mail: abdulla_gadzhiev_1986@mail.ru

Резюме. Цель. Целью исследования является повышение физико-термических и эксплуатационных характеристик жаростойкого керамзитового бетона на активированном вяжущем путем предварительного электроразогрева смеси. **Метод.** Применена методика, разработанная научно-исследовательским институтом бетона и железобетона им. Гвоздева В.В. **Результат.** По сравнению с сушкой при температуре 105°C эксплуатационные свойства жаростойкого керамзитового бетона повышаются за счет равномерного нагрева образцов по телу бетона, которое позволяет снизить поровое давление в структуре бетона, за счет удаления физически несвязанной воды. В качестве крупного заполнителя применяется керамзит, а мелкого заполнителя - керамзитовый песок; в качестве вяжущего активированная композиционная связка из местного минерального сырья портландцемент + обожженная аргеллитовая глина. В теле бетона, за счет удаления физически несвязанной воды вследствие снижения порового давления уменьшается образование трещин в межпоровых перегородках, что предотвращает взрывообразное разрушение жаростойкого керамзитового бетона и улучшает его физико-механические, теплофизические и эксплуатационные характеристики. Активированное композиционное вяжущее на основе связки портландцемент-тонкомолотая обожженная аргеллитовая глина уменьшает усадочные деформации, повышает предел прочности бетона, а также огнестойкость. **Вывод.** Разработанный состав жаростойкого керамзитового бетона можно применить при монолитной футеровки стен туннельной печи для обжига керамического кирпича, а также при бетонировании различных конструкций печей промышленности строительной индустрии. Проведенные исследования показали возможность и целесообразность применения электроразогрева при твердении жаростойкого керамзитобетона на композиционном вяжущем. Применение электроразогрева повышает прочность жаростойкого керамзитобетона до и после нагревания до высоких температур. Установлены оптимальные режимы электроразогрева жаростойкого керамзитобетона на композиционном вяжущем.

Ключевые слова: жаростойкий, бетон, электроразогрев, керамзит, вяжущее, композиционное, активированное, аргеллитовая глина

TECHNICAL SCIENCE
BUILDING AND ARCHITECTURE

THE EFFECT OF PRELIMINARY ELECTRIC RADIO HEATING ON THE PHYSICAL
AND THERMAL CHARACTERISTICS OF THE HEAT-RESISTANT
CERAMZITONE-CONCRETE BASED ON COMPOSITE BINDER OF LOCAL
MINERAL RAW MATERIALS

Yulduz A. Alkhasova³, Abdulla M. Gadzhiev⁴, Khaji N Khadzhishalapov¹, Tolya A. Hezhev²

^{1,3,4}Daghestan State Technical University,

^{1,3,4}70 I. Shamilya Ave., Mahachkala 367026, Russia,

² H.M. Berbekov Kabardino-Balkarian State University,

²173 Chernyshevskogo Str., Nalchik 360004, Russia,

¹e-mail: yarus-x@mail.ru, ²e-mail: hejev_tolya@mail.ru,

³e-mail: Yulduz1312@yandex.ru, ⁴e-mail: abdulla_gadzhiev_1986@mail.ru

Abstract Objectives The aim of the study is to increase the physico-thermal and operational characteristics of heat-resistant ceramsite concrete with an activated binder by pre-heating the mixture. **Method** To conduct the study, a technique was developed by the Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev. **Results** An analysis of the study results of the effect of preliminary electric heating on the physico-thermal characteristics of heat-resistant ceramsite concrete on the basis of a composite binder showed that, in comparison with drying at a temperature of 105°, the operational properties of heat-resistant ceramsite concrete are enhanced by uniform heating of the samples along the concrete body. This is due to the pore pressure in the concrete structure being reduced by removing physically bound water. Ceramsite is used as large filler while ceramsite sand is used as small filler; activated composite combination of local mineral raw materials consisting of Portland cement and calcined argillitic clay is used as a binder. In the concrete body, due to the removal of physically bound water caused by the decrease in pore pressure, the formation of cracks in the interporal partitions decreases, preventing the explosive destruction of heat-resistant ceramsite concrete and improves its physico-mechanical, thermal and operational characteristics. Activated composite binder based on the combination of Portland cement and fine ground argillite clay reduces shrinkage deformations and increases the concrete strength as well as its heat resistance. Concretes with activated composite binder are less susceptible to volume change during the heating process, contributing to greater preservation of concrete strength and structure due to lower stress levels caused by the temperature deformations. **Conclusion** The composition of the developed heat-resistant ceramsite concrete allows its use for monolithic lining of the walls of a tunnel kiln for burning ceramic bricks, as well as various concreting furnaces for the construction industry. The conducted research demonstrates the possibility and expediency of using electric heating for the hardening of heat-resistant ceramsite concrete with a composite binder. The use of electric heating increases the strength of heat-resistant ceramsite concrete both before and after heating to high temperatures. Optimised modes of electric heating of heat-resistant ceramsite concrete with a composite binder are established.

Keywords: heat-resistant, concrete, electric heating, ceramsite, binder, composite, activated, argillitic clay

Введение. Технический прогресс при изготовлении и ремонте футеровок тепловых агрегатов неразрывно связан с внедрением новых видов эффективных огнеупорных материалов – легких жаростойких бетонов.

Применение легких жаростойких бетонов взамен штучных огнеупоров в футеровках различных тепловых агрегатов позволит снизить материалоемкость футеровки на 30-40%, сократить теплотери через футеровку на 12-15% и, следовательно, расход топлива, получить экономию трудозатрат в процессе изготовления и эксплуатации футеровки на 25-35%.

Однако, для изготовления жаростойких бетонов применяются дорогостоящие и дефицитные привозные материалы, такие как корунд, хромит, шамот и др.

Повысить эффективность применения жаростойких бетонов возможно за счет использования местных материалов, особенно отходов промышленности, а также применением методов интенсификации реакции твердения [2-6,11,13,16-18,20].

В связи с этим разработаны составы легких жаростойких бетонов с применением местных материалов и отходов предприятий промышленности строительной индустрии Республики Дагестан с предварительным кондуктивным электроразогревом смеси и сушки изделий при температуре 105°C.

В качестве заполнителей использованы керамзитовый гравий и керамзитовый дробленый песок производства Кизилюртовского керамзитового завода, а в качестве вяжущего композиционная связка на основе портландцемента и тонкомолотой добавки «бой керамического кирпича + обожженная аргеллитовая глина» Каспийского и Буйнакского месторождений, составы которых приведены в табл.1.

Таблица 1. Составы жаростойкого керамзитобетона на активированном композиционном вяжущем

Table 1. The compositions of heat-resistant claydite on activated composite binder

№№ состава бетона	Расход материалов на 1 м³ бетона							добавка СП-1, кг
	портландце- мент, кг	тонкомолотая добавка			заполнитель, л			
		в % от портландце- мента	бой керамического кирпича, кг	обоженная ар- геллитовая глина, кг	фракции 5-10 мм	фракции 2-5 мм	фракции до 2 мм	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	405	10	25,5	25,5	360	360	580	0,68
2	315	30	67,5	67,5	360	360	580	0,68
3	270	40	90,0	90,0	360	360	580	0,68
4	225	50	112,6	112,5	360	360	580	0,68

Постановка задачи. Целью настоящей работы является исследование влияния предварительного электроразогрева на свойства жаростойкого бетона с керамзитовым заполнителем на композиционном вяжущем из местного минерального сырья на основе портландцемента с тонкомолотой добавкой «бой керамического кирпича + обожженная аргеллитовая глина» обеспечивающими процесс твердения; установление целесообразности применения предварительного электроразогрева до сушки при температуре 105°C при твердении жаростойких бетонов на керамзитовом заполнителе на основе композиционного вяжущего; разработка оптимальных режимов предварительного электроразогрева и изучение влияния режимов предварительного электроразогрева, на основные свойства жаростойких бетонов с керамзитовым заполнителем на основе композиционного вяжущего.

Методы исследования. Исследования влияния предварительного электроразогрева проводились на лабораторной установке, приведенной на рис. 1, по методике, предложенной в работе [1].

С целью изучения влияния предварительного электроразогрева на физико-термические характеристики бетона в зависимости от температуры термообработки образцы высушивались при температуре 105 °C.

Прочность жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе после высушивания до постоянной массы при температуре 105°C принимали за 100%.

Конструкция тепловых агрегатов из жаростойкого бетона изготавливают либо в монолите, непосредственно на месте строительства, либо сборными в полигонных условиях [6-10,12,14,15].

Для ускорения процесса твердения, повышения физико-термических и эксплуатационных показателей и качества жаростойкого бетона весьма эффективным является применение тепловой обработки при изготовлении бетонной смеси.

В лаборатории строительных материалов кафедры «Строительные материалы и инженерные сети», в научно-исследовательской лаборатории центра экспертизы и аудита в строительстве ФГБОУ ВО «Дагестанского государственного технического университета» проведены исследования влияния кондуктивного электронагрева жаростойкой бетонной смеси на основе керамзитового заполнителя с активированным композиционным вяжущим.

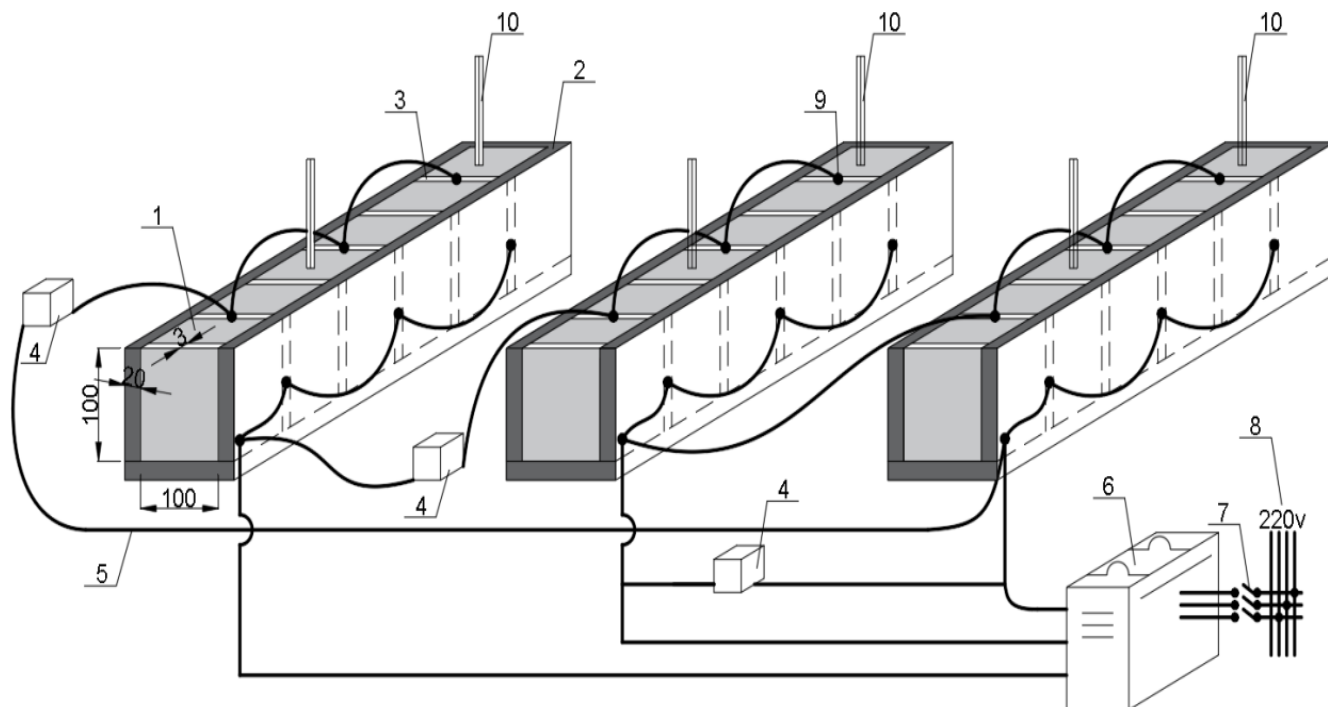


Рис. 1. Схема лабораторной установки для электронагрева

1 – образец из керамзитобетона; 2 – корпус из композитного материала; 3 – электрод-перегородка; 4 – сопротивление; 5 – электропровода; 6 – трансформатор; 7 – выключатель; 8 – источник энергии; 9 – клейма; 10 – термометр

Fig. 1. Diagram of the laboratory installation for electric heating

1 - sample of expanded clay; 2 - composite body; 3 - partition electrode; 4 - resistance; 5 - electric wires; 6 - transformer; 7 - the switch; 8 - energy source; 9 - stamps; 10 - thermometer

Исследования проводили на образцах-кубах размерами 10×10×10 см, образцы изготавливали в специальных формах из композитного материала толщиной 20 мм с поперечными металлическими перегородками, которые выполняли роль электродов.

Поперечные перегородки изготавливали из листовой стали толщиной 3 мм. Каждая форма состояла из шести образцов. Ток подавали к каждому электроду для создания одинаковых условий в процессе прогрева.

Каждая серия состояла из 18 образцов, одновременно прогреваемых в трех формах. После электронагрева по три образца испытывали на прочность при сжатии, а остальные образцы помещали в лабораторный сушильный шкаф и выдерживали при температуре 105°C до достижения постоянной массы.

После сушки по три образца испытывали на прочность при сжатии.

Обсуждение результатов. Результаты испытания на прочность образцов оптимального состава в зависимости от процентного содержания тонкомолотой добавки в составе вяжущего приведены в табл. 2.

Таблица 2. Влияние предварительного электроразогрева жаростойкого керамзитобетона на активированном композиционном вяжущем на прочность при сжатии

Table 2. The effect of preliminary electrical heating of heat-resistant claydite-concrete on activated composite binder for compressive strength

№ №	Темпера- тура разо- грева, °C	Режимы твердения, ч			Средняя плот- ность ρ, кг/м³	Предел прочности при сжатии в МПа после нагре- вания до температуры, °C					
		выдержка перед электро- прогревом	подъем темпера- туры	изотерми- ческий прогрев		20	100	400	600	800	1000
Состав 1											
1	90	0,5	2	2	1470	13,26	15,86	13,11	12,71	11,54	9,16
2	90	3	2	2	1470	15,23	18,71	13,87	13,47	12,36	10,61
3	90	4	2	2	1470	20,41	21,06	14,77	14,17	13,51	11,34
4	80	0,5	1,5	2	1470	11,31	14,73	13,64	13,12	9,43	8,24
5	80	3	1,5	2	1470	13,26	17,23	14,12	13,77	10,33	10,73
6	80	6	1,5	2	1470	14,87	19,51	14,87	14,12	12,58	10,61
7	60	0,5	1	2	1470	10,01	13,06	13,82	13,75	9,82	7,88
8	60	3	1	2	1470	11,15	14,27	14,62	14,37	10,17	9,16
9	60	6	1	2	1470	12,48	16,47	15,12	14,18	21,98	10,52
Состав 2											
1	90	0,5	2	2	1470	15,91	18,61	16,72	14,37	12,17	10,82
2	90	3	2	2	1470	16,53	21,34	17,8	15,42	13,27	11,31
3	90	4	2	2	1470	18,61	23,57	19,72	16,83	14,97	12,22
4	80	0,5	1,5	2	1470	13,15	15,52	13,67	12,37	10,81	9,31
5	80	3	1,5	2	1470	14,12	18,34	16,24	13,64	11,82	10,61
6	80	6	1,5	2	1470	15,68	27,85	18,1	15,72	13,63	11,37
7	60	0,5	1	2	1470	12,57	14,78	13,17	11,24	10,27	8,54
8	60	3	1	2	1470	13,82	17,37	14,11	13,15	11,17	9,72
9	60	6	1	2	1470	14,67	17,82	15,87	14,27	12,63	11,63
Состав 3											
1	90	0,5	2	2	1470	16,10	18,91	17,12	14,82	12,67	11,12
2	90	3	2	2	1470	16,72	21,72	18,32	15,87	13,92	11,87
3	90	4	2	2	1470	19,11	23,92	20,12	17,22	15,27	12,74
4	80	0,5	1,5	2	1470	13,47	15,93	13,64	12,85	11,17	9,68
5	80	3	1,5	2	1470	14,53	18,82	16,19	14,11	12,21	10,93
6	80	6	1,5	2	1470	16,11	24,15	18,87	16,13	14,15	11,85
7	60	0,5	1	2	1470	13,11	15,13	13,12	12,32	10,91	9,13
8	60	3	1	2	1470	14,11	18,32	12,87	13,22	11,82	10,12
9	60	6	1	2	1470	15,91	23,86	18,12	15,93	13,97	10,83
Состав 4											
1	90	0,5	2	2	1470	17,12	19,15	18,17	17,63	10,11	8,85
2	90	3	2	2	1470	18,21	22,14	21,77	20,65	11,72	10,12
3	90	4	2	2	1470	20,53	25,77	24,64	23,12	12,55	11,31
4	80	0,5	1,5	2	1470	16,22	18,21	17,12	16,51	9,37	7,31
5	80	3	1,5	2	1470	17,47	21,47	20,31	19,48	10,11	8,57
6	80	6	1,5	2	1470	19,34	24,17	23,32	22,31	11,47	9,87
7	60	0,5	1	2	1470	15,12	19,61	16,15	15,11	8,12	6,87
8	60	3	1	2	1470	15,92	20,52	19,11	17,22	9,37	7,62
9	60	6	1	2	1470	17,67	23,42	21,82	20,37	10,53	8,22

В табл. 3 приведены зависимость прочности жаростойкого керамзитобетона от количества тонкомолотой добавки и температуры нагрева.

Таблица 3. Зависимость прочности жаростойкого керамзитобетона с композиционным вяжущим без предварительного электроразогрева оптимального гранулометрического состава от количества тонкомолотой добавки и температуры нагрева

Dependence of the strength of heat-resistant claydite-concrete with a composite binder without preliminary electrical heating of the optimal particle size distribution on the amount of fine-milled additive and the heating temperature

№ п/п	Количество тонкомолотой добавки в % от массы портланд-цемента	Предел прочности при сжатии в МПа после нагревания до температуры в °C.					
		20	100	400	600	800	1000
1	90:10	10,72	15,80	11,21	10,62	6,67	6,82
2	70:30	11,32	16,87	12,63	11,78	11,32	7,87
3	60:40	11,67	17,11	13,88	12,47	11,82	8,44
4	50:50	12,32	18,27	14,42	13,62	11,91	8,48

Сравнительный анализ изменения зависимости прочности от температуры нагрева показывает, что значение прочности образцов бетона с предварительным электроразогревом на 30÷35% выше по сравнению с результатами образцов без предварительного кондуктивного электроразогрева.

Увеличение прочности бетона с предварительным кондуктивным электроразогревом связано с равномерным распределением теплового потока по всему объему испытуемых образцов бетона.

Предварительный кондуктивный электроразогрев бетонной смеси способствует интенсификации реакции гидратации портландцемента и значительно ускоряет скорость набора прочности бетона в начальный период твердения, а также способствует снижению количества химически несвязанной воды и уменьшению порового пространства в структуре бетона, и при дальнейшей сушки при температуре 105°C и нагреве до температуры 1000°C.

Необходимо отметить возрастание активности воды при повышенных температурах за счет увеличения степени диссоциации по сравнению с водой в бетонных смесях при нормальных температурных условиях.

Как видно из рис. 2 рост прочности бетона при предварительном электроразогреве, а так же после сушки до температуры 105°C до постоянной массы объясняется тем, что при предварительном электроразогреве происходит процесс самопропаривание, связанное с наличием достаточного количества влаги содержащих в зернах заполнителя.

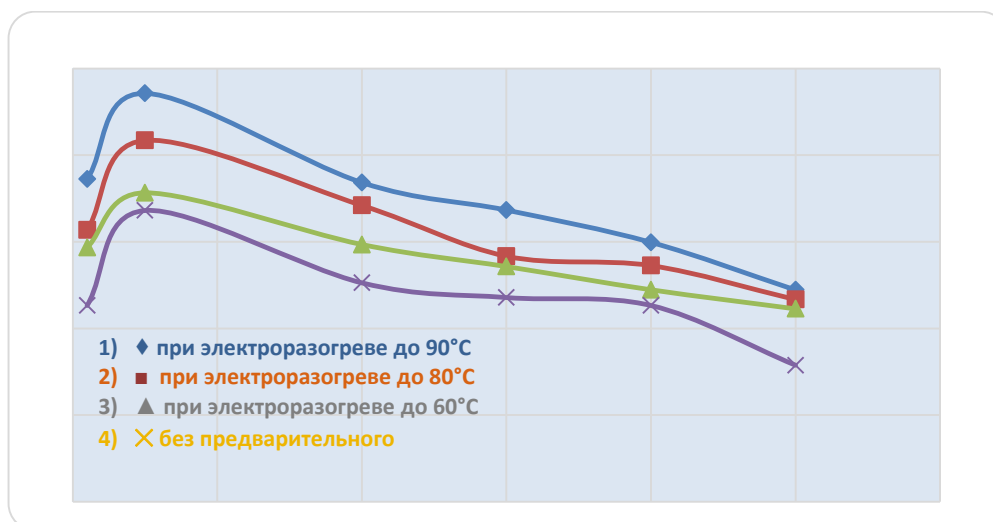


Рис. 2. Зависимость прочности жаростойкого бетона оптимального состава от температур нагрева
Fig. 2. The dependence of the strength of heat-resistant concrete of the optimal composition of the heating temperature

При нагревании образцов бетона до температуры 400, 600, 800 и 1000°C прочность бетона снижается с увеличением температуры нагревания в результате изменения структуры затвердевшего портландцемента вследствие обезвоживания и разрушения пространственной решетки кристаллогидратов при их дегидратаций, сопровождаемые потерей их прочности, а так же в результате разности в деформациях цементного камня и заполнителя при первом нагреве.

Установлено, что максимальное напряжение в бетоне возникает при резком подъеме температуры и вследствие чего появляются значительные температурные напряжения. Эти процессы происходят при температуре предварительного разогрева в интервале от 40 до 70°C.

Для снижения влияния напряженного состояния на структуру твердеющего жаростойкого бетона на керамзитовом заполнителе рекомендуется при температуре 40-70°C в течении часа устроить технологический перерыв в подъеме температуры [1].

Увеличение скорости подъема температуры от 10°C/час до 40°C/час не оказывает существенного влияния на изменения прочностных характеристик бетона как до, так и после нагревания образцов бетона до температуры 1000°C.

Нейтрализация деструктивных явлений при увеличении скорости нагрева до 40°C/час в процессе предварительного электроразогрева связано наличием в бетоне активированного композиционного вяжущего с развитой удельной поверхностью, который снижает температурные деформации в бетоне и способствует интенсификации реакции гидратации с повышением температуры.

Для жаростойких бетонов на основе керамзитового заполнителя очень важно снижение количества влаги до сушки, поэтому при подборе состава бетона важную роль играет водотвердое отношение. Водотвердое отношение для жаростойких бетонов колеблется в пределах от 0,2 до 0,35, чтобы подвижность смеси по осадке стандартного конуса не превышала 2см.

Как указано в работе [1] уменьшения водотвердого отношения до 0,25 приводит к повышению прочности после электроразогрева до 50%.

Причиной замедления твердения бетонов с большим содержанием воды является увеличение расстояния между частицами цемента из-за большого слоя воды и силы взаимодействия между частицами уменьшается. Изменение прочности бетона при сжатии одинаково, при водотвердом отношении 0,2÷0,25, что при нормальных влажных условиях твердения, так и с применением электроразогрева.

При формировании изделий из жаростойкого бетона для уплотнения смеси и плотной упаковки крупного и мелкого заполнителя необходимо применение дополнительного пригруза. Предварительный электроразогрев позволяет оптимизировать подвижность бетонной смеси за счет регулирования водотвердого отношения, количества пластифицирующей добавки и количества активированного композиционного вяжущего для повышения эксплуатационных характеристик жаростойких изделий.

Это достигается предварительным кондуктивным электроразогревом смеси за счет удаления химически несвязанной воды из растворной части бетона, а также влаги поровой структуры заполнителя.

Тепловые агрегаты, выполненные из жаростойких бетонов перед введением в эксплуатацию, необходимо сушить. Удаление химически несвязанной воды из бетона в процессе предварительного кондуктивного электроразогрева необходимо осуществлять по специально разработанному режиму, чтобы это не сказывалось на физико-термических характеристиках бетона.

Снижение количества химически несвязанной воды является желательным для жаростойких бетонов, чтобы сократить технологический процесс сушки и вывода на рабочий режим теплового агрегата.

Сушка блоков из жаростойкого бетона должна производиться не ранее чем через 7 суток или после тепловой обработки. В процессе сушки жаростойкого бетона обеспечивается удаление паров из рабочего пространства путем естественной и принудительной вентиляции. Для сушки теплоизоляции в туннельной печи используются газовые горелки, предназначенные для обжига изделий, а так же электрокалориферы.

Для повышения долговечности конструкций теплоизоляции необходимо снижать температуру для охлаждения блоков из жаростойкого бетона до 600°C со скоростью 50°C/ч, а с температуры 600°C до 100°C со скоростью 20°C/ч с отключением источника тепла по мере необходимости.

Применение предварительного электроразогрева сокращает технологический процесс сушки изделий на 20-25% без снижения физико-термических и эксплуатационных характеристик изделий из жаростойкого керамзитового бетона на основе активированного композиционного вяжущего.

На рис. 3 приведен график первого нагрева блоков из жаростойкого керамзитового бетона на основе активированного композиционного вяжущего.

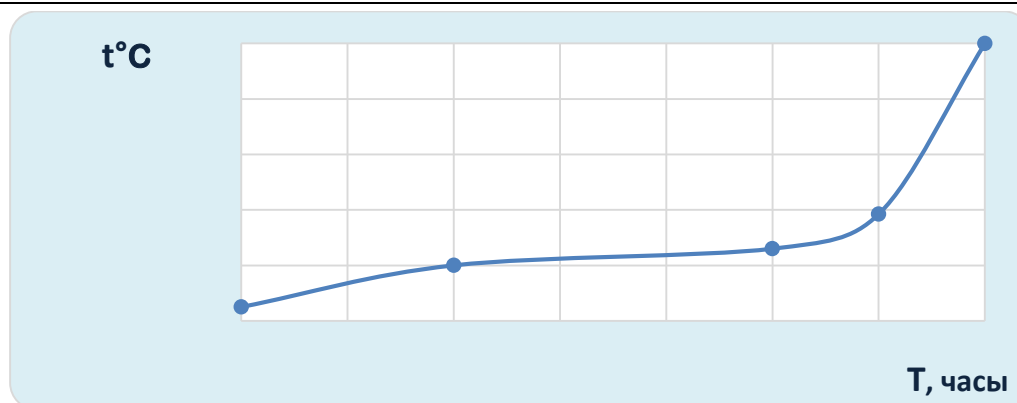


Рис.3. График первого нагрева блоков из жаростойкого керамзитового бетона на активированном композиционном вяжущем

Fig.3. Schedule of the first heating of blocks of heat-resistant claydite concrete on the activated composite binder

Вывод. На основании полученных результатов и анализа проведенных исследований в области предварительного электроразогрева бетонных смесей можно сделать вывод, что предварительный электроразогрев жаростойкого бетона с керамзитовым заполнителем на основе активированного композиционного вяжущего позволит получить бетон с более высокими физико-термическими и эксплуатационными характеристиками, а также сократить технологический процесс изготовления жаростойких изделий, период сушки и вывода теплового агрегата на рабочий режим.

Установлено, что наиболее благоприятным режимом первого нагрева является ступенчатый нагрев, так как способствует снижению деструктивных процессов в бетоне, вызванные структурными нарушениями в период подъема температуры первого нагрева. Предварительный электроразогрев позволяет получить бетон высокого качества при значительном сокращении времени термической обработки.

Библиографический список:

1. Федоров А.В. Разработка режимов электропрогрева жаростойких бетонов[Текст]/ А.В. Федоров., П.А. Михальчук // сб.тр НИИЖБ 1964. –С.214-227.
2. Хаджишалапов Г.Н. Влияние предварительного разогрева на термомеханические свойства жаростойкого шамотного бетона на силикат-натриевом композиционном вяжущем[Текст]: дис. канд.техн. наук: 05.23.05/ Хаджишалапов Гаджимагомед Нурмагомедович – М., 1995 – 22-25с.
3. Тотурбиев Б.Д. Местные строительные материалы, полученные по ресурсосберегающим экологически чистым и наукоемким технологиям[Текст]:Б.Д. Тотурбиев, Г.Н. Хаджишалапов, З.А. Мантуров и др// сб тр. Академия наук – 1994. – С12-15.
4. Некрасов К.Д. Развитие технологии жаростойких бетонов[Текст]/ сб.тр. – НИИЖБ –1981. – С.3-11.
5. Некрасов К.Д. Сушка и первый нагрев тепловых агрегатов из жаростойких бетонов[Текст]/ К.Д. Некрасов, В.В. Жуков, В.Ф. Гуляева. – М.: Стройиздат. 1976. –96с.
6. Ремнев В.В. Жаростойкие бетоны и возможности их применения для тепловых агрегатов[Текст]/ В.В. Ремнев// Строительные материалы. – 1996. – №3. – С.18-19.
7. Милонов В.М. Жаростойкий бетон и железобетон в тепловых агрегатах химической промышленности [Текст]/ В.М. Милонов//Бетон и железобетон – 1972 – №2. – С.11-15
8. Месеняшин Г.В. Использование керамзита в жаростойком бетоне на ВГЦ в ограждающих конструкциях тепловых агрегатов. [Текст]/Г.В. Месеняшин, Е.В. Зализовский// Жаростойкие материалы, изделия и конструкции – Челябинск, – 1987 – С.43-44
9. Ферворнер О. Огнеупорные материалы для стекловаренных печей/ О. Ферворнер, К. Берндт: Пер. с нем. О.Н. Поискова/ Перевод изд.: FeurfisteBaustoffeierGkassschmetzanigenO. Verwomer, K. Bemdt/Под.Ред. А.С. Власова. – М.: Стройиздат, 1984 – 260с.
10. Rebstadt,G. Brennwagena uffuten and Brennhifsmittel ful die Grobkeramih Ziegefind. Int. – 1999. – 52,№8, S. 20-30/
11. Busby, T.S.:Tahk – Blocks for G lass Technol. 1966 – С. 47-51.
12. Арбузова, Т.Б. Исследование местных материалов/ Т.Б. Арбузова, С.Ф. Коренкова, Г.Н. Брусенков//Строительные материалы. – 1988. – №4 – С.20-21.

13. Технология изготовления жаростойких бетонов: (НИИЖБ Справ. Пособие к СНИПу). –М.: Стройиздат, 1991 –63 с.
14. Хаджишалапов Г.Н. Жаростойкий базальтовый бетон на активированном композиционном вяжущем из местного минерального сырья[Текст]/ Г.Н. Хаджишалапов, А.М. Р.М. Курбанов. – Махачкала.: Издательство «Формат», 2017 – 156с.
15. Прядко, В.М. Исследование технологии формирования и тепловой обработки блоков из жаростойкого бетона/ В.М. Прядко, А.А. Бородин. – В кн.: Опыт применения жаростойких бетонов в промышленности и строительстве: Тез.докл. реест. Конф. Днепропетровск, 1978, - С.18-19.
16. Бисултанов Р.Г. Цементы низкой водопотребности на основе активной минеральной добавки различного происхождения [Текст]/Р.Г. Бисултанов, А. Ю. Муртазаев, М.Ш. Саламанова//Вестник Дагестанского государственного технического университета. – 2016. – №1. – С.98 – 107.
17. Бирюков, А.И. Интенсификация изготовления изделий из керамзитобетона методом горячего формования/ А.И. Бирюков. – Харьков.: Издательство Высшая школа при ХГУ, 1977. – 52с.
18. Крылов, Б.А., Ли А.И. Форсированный электроразогрев бетона/ Б.А. Крылов. – М.: Стройиздат, 1975. – 160с.
19. Некрасов К.Д. Легкие жаростойкие бетоны на пористых заполнителях[Текст]/ К.Д. Некрасов, М.Г. Масленникова. – М: Стройиздат, 1982 –162 с.
20. Саталкин, А.В. Влияние режимов электроразогрева смеси на свойствабетона и керамзитобетона/ А.В. Саталкин, П.Г. Комохов.// Бетон и железобетон. – 1969 - №11 – С.17-21.

References:

1. Fedorov A.V., Mikhal'chuk P.A. Razrabotka rezhimov elektroprogreva zharostoikikh betonov. Sb. tr. NIIZhB. 1964. S.214-227. [Fedorov A.V., Mikhal'chuk P.A. Development of electric heating modes of heat-resistant concrete. Sb. tr. NIIZhB. 1964. P. 214-227. (in Russ.)]
2. Khadzhashalapov G.N. Vliyanie predvaritel'nogo razogreva na termomekhanicheskie svoystva zharostoikogo shamotnogo betona na silikat-natrievom kompozitsionnom vyazhushchem. Dis. kand.tekhn. nauk. M.; 1995. S. 22-25. [Khadzhashalapov G.N. Effect of preheating on the thermomechanical properties of refractory chamotte concrete with a silicate-sodium composite binder. PhD in technical sciences thesis. M.; 1995. P. 22-25. (in Russ.)]
3. Toturbiev B.D., Khadzhashalapov G.N., Manturov Z.A. i dr. Mestnye stroitel'nye materialy, poluchennye po resursoberegayushchim ekologicheski chistym i naukoemkim tekhnologiyam. Sb. tr. Akademiya nauk. 1994. S. 12-15. [Toturbiev B.D., Khadzhashalapov G.N., Manturov Z.A. et al. Local building materials obtained by resource-saving environmentally friendly and science-intensive technologies. Collection of works of RAS. 1994. P. 12-15. (in Russ.)]
4. Nekrasov K.D. Razvitie tekhnologii zharostoikikh betonov. Sb.tr. NIIZhB. 1981. S. 3-11. [Nekrasov K.D. Development of technology of heat-resistant concrete. Sb.tr. NIIZhB. 1981. P. 3-11. (in Russ.)]
5. Nekrasov K.D. Zhukov V.V., Gulyaeva V.F. Sushka i pervyi nagrev teplovykh agregatov iz zharostoikikh betonov. M.: Stroizdat; 1976. 96 s. [Nekrasov K.D. Zhukov V.V., Gulyaeva V.F. Drying and first heating of heat unit from heat-resistant concrete. M.: Stroizdat; 1976. 96 p. (in Russ.)]
6. Remnev V.V. Zharostoikie betony i vozmozhnosti ikh primeneniya dlya teplovykh agregatov. Stroitel'nye materialy. 1996;3:18-19.[Remnev V.V. Heat-resistant concrete and the possibility of their use for thermal units. Construction Materials. 1996;3:18-19. (in Russ.)]
7. Milonov V.M. Zharostoikii beton i zhelezobetonov v teplovykh agregatakh khimicheskoi promyshlennosti. Beton i zhelezobeton. 1972;2:11-15.[Milonov V.M. Heat-resistant concrete and reinforced concrete in thermal units of the chemical industry. Beton i zhelezobeton. 1972;2:11-15. (in Russ.)]
8. Mesenyashin G.V., Zalizovskii E.V. Ispol'zovanie keramzita v zharostoikom betone na VGTs v ograzhdayushchikh konstruktivnykh teplovykh agregatov. Zharostoikie materialy, izdeliya i konstruksii. Chelyabinsk; 1987. C. 43-44. [Mesenyashin G.V., Zalizovskii E.V. The use of ceramsite in heat-resistant concrete on the high alumina cement in the enclosing structures of thermal units. Heat-resistant materials, products and constructions. Chelyabinsk; 1987. C. 43-44. (in Russ.)]
9. Fervorner O., Berndt K. Ogneupornye materialy dlya steklovarenykh pechei. M.: Stroizdat; 1984. 260 s. [Fervorner O., Berndt K. Refractory materials for glass melting furnaces. M.: Stroizdat; 1984. 260 p. (in Russ.)]
10. Rebstadt G. Brennwagenaufbauten und Brennhilfsmittel fur die Grobkeramik. Ziegelind. Int. 1999;52(8):20-30.
11. Busby T. S. Tank Blocks for Glass Furnaces. Society of Glass Technology. 1966. P. 47-51.
12. Arbuzova T.B., Korenkova S.F., Brusenkov G.N. Issledovanie mestnykh materialov. Stroitel'nye materialy. 1988;4:20-21. [Arbuzova T.B., Korenkova S.F., Brusenkov G.N. Study of local materials. Construction Materials. 1988;4:20-21. (in Russ.)]
13. Tekhnologiya izgotovleniya zharostoikikh betonov: (NIIZhB Sprav. Posobie k SniPu). M.: Stroizdat; 1991. 63 s. [Manufacturing technology of heat-resistant concrete: (NIIZHB Reference Guide for SNIIP).). M.: Stroizdat; 1991. 63 p. (in Russ.)]

14. Khadzhishalapov G.N., Kurbanov R.M. Zharostoikii bazal'tovyi beton na aktivirovannom kompozitsionnom vyazhushchem izmestnogo mineral'nogo syr'ya. Makhachkala: Izdatel'stvo "Format"; 2017. 156 s.[Khadzhishalapov G.N., Kurbanov R.M. Heat-resistant basalt concrete with the activated composite binder made of local mineral raw materials. Makhachkala: Publishing House "Format"; 2017. 156 p. (in Russ.)]
15. Pryadko V.M., Borodin A.A. Issledovanie tekhnologii formirovaniya i teplovoi obrabotki blokov iz zharostoikogo betona. Tez. dokl. respubl. konf. "Opyt primeneniya zharostoikikh betonov v promyshlennosti i stroitel'stve". Dnepropetrovsk; 1978. S.18-19.[Pryadko V.M., Borodin A.A. Research of technology of formation and heat treatment of blocks from heat-resistant concrete. Abstracts of Republican conference "Experience of using heat-resistant concrete in industry and construction". Dnepropetrovsk; 1978. P.18-19. (in Russ.)]
16. Bisultanov R.G., Murtazaev A.Yu., Salamanova M.Sh. Tsementy nizkoi vodopotrebnosti na osnove aktivnoi mineral'noi dobavki razlichnogo proiskhozhdeniya. Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskei nauki. 2016;1:98 – 107. [Bisultanov R.G., Murtazaev A.Yu., Salamanova M.Sh. Low water cements based on active mineral additives of various origins. Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences. 2016;1:98 – 107. (in Russ.)]
17. Biryukov A.I. Intensifikatsiya izgotovleniya izdelii iz keramzitobetona metodom goryachego formovaniya. Khar'kov: Izdatel'stvo Vysshaya shkola pri KhGU; 1977. 52 s.[Biryukov A.I. Intensification of the production of ceramsite concrete products by the hot forming method. Khar'kov: Izdatel'stvo Vysshaya shkola pri KhGU; 1977. 52 p. (in Russ.)]
18. Krylov B.A., Li A.I. Forsirovannyi elektrorazogrev betona. M.: Stroizdat; 1975. 160 s. [Krylov B.A., Li A.I. Forced electrical heating of concrete. M.: Stroizdat; 1975. 160 p. (in Russ.)]
19. Nekrasov K.D., Maslennikova M.G. Legkie zharostoikie betony na poristyykh zapolnitelyakh. M: Stroizdat; 1982. 162 s.[Nekrasov K.D., Maslennikova M.G. Lightweight heat-resistant concretes with porous fillers. M: Stroizdat; 1982. 162 p. (in Russ.)]
20. Satalkin A.V., Komokhov P.G. Vliyanie rezhimov elektrorazogreva smesi na svoistva betona i keramzitobetona. Beton i zhelezobeton. 1969;11:17-21.[Satalkin A.V., Komokhov P.G. Influence of mixture electric heating on the properties of concrete and ceramsite concrete. Beton i zhelezobeton. 1969;11:17-21. (in Russ.)]

Сведения об авторах:

Алхасова Юлдуз Алхасовна – кандидат технических наук, доцент, кафедра строительные материалы и инженерные сети.

Гаджиев Абдулла Магомедсаламович - ассистент, кафедра технологии и организация строительного производства.

Хаджишалапов Гаджи Нурмагомедович – доктор технических наук, профессор, декан архитектурно-строительного факультета.

Хежев Толя Амирович – доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки Кабардино-Балкарской республики, действительный член Адыгской (Черкесской) Международной академии наук, заведующий кафедрой строительного производства.

Information about the authors:

Yulduz A. Alkhasova – Cand. Sci. (Technical), Assoc. Prof., Department of building materials and engineering networks.

Abdulla M. Gadzhiev – Assistant.

Khaji N. Khadzhishalapov – Dr. Sci. (Technical), Prof., Dean of the Faculty of Architecture and Construction.

Tolya A. Hezhev - Dr. Sci. (Technical), Prof., Honored Worker of Science of the Kabardino-Balkarian Republic, Full member of the Adyghe (Circassian) International Academy of Sciences, Head of the Department of Construction Industry.

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 13.07.2018.

Принята в печать 29.08.2018.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 13.07.2018.

Accepted for publication 29.08.2018.

Для цитирования: Баутдинов Д.Т., Джамалудинов М.М., Жукова К.С. Напряженное состояние обделки безнапорного гидротехнического туннеля круговой формы, проложенного в анизотропном скальном грунте. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2018;45 (3):155-164. DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-3-155-164

For citation: Bautdinov D.T., Djamaludinov M.M., Zhukova K.S. Stressed condition of the wrapping without-drive hydrotechnical tunnel of the circular form, proposed in anisotropic rock ground. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2018; 45(3):155-164. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-3-155-164

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

УДК 502/504 : 69.035.4 : 539.31

DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-3-155-164

НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ОБДЕЛКИ БЕЗНАПОРНОГО ГИДРОТЕХНИЧЕСКОГО ТУННЕЛЯ КРУГОВОЙ ФОРМЫ, ПРОЛОЖЕННОГО В АНИЗОТРОПНОМ СКАЛЬНОМ ГРУНТЕ

Баутдинов Д.Т.¹, Джамалудинов М.М.², Жукова К.С.³

¹Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева, 127550, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49, Россия,

²АО «ЧиркейГЭСстрой»,

²357506, Россия, г. Пятигорск, пос. Энергетик, ул. Подстанционная, 18, Россия,

³ООО «РТ - СоцСтрой»,

³121151, г. Москва, наб. Тараса Шевченко, 23а, Россия,

¹e-mail: damir.tt1@mail.ru, ²e-mail: Djamaludinov86@mail.ru,

³e-mail: zhukova.kristina.sergeevna@yandex.ru

Резюме. Цель. Целью исследования является параметрический анализ напряженного состояния обделки безнапорного гидротехнического туннеля круговой формы сечения, и прилегающего анизотропного скального грунта от собственного веса грунтовой среды при различных отношениях упругих характеристик грунтовой среды в ортогональных направлениях по модели трансверсально-изотропной среды. **Метод.** Расчет гидротехнического туннеля большой протяженности, проложенного в крепком трансверсально-изотропном скальном грунте, сведен к задаче плоской деформации теории упругости для трансверсально-изотропной среды, содержащей туннельную выработку. Применена модель трансверсально-изотропной среды (частный случай анизотропной среды), при которой грунт в одной плоскости обладает характеристиками изотропной среды (плоскость изотропии), а в перпендикулярном направлении – отличными от изотропной среды характеристиками. Применен метод конечного элемента с использованием программного комплекса ANSYS. Предварительно определены размеры и тип конечного элемента, пригодного для расчета на основе решения в программном комплексе верификационной задачи, в качестве которой принята задача Кириша. **Результат.** Определены относительные тангенциальные напряжения на внешнем и внутреннем контуре обделки, которые позволяют провести армирование бетонной обделки при различных глубинах заложения туннеля. Определены тангенциальные напряжения в прилегающем скальном массиве, позволяющие оценивать прочность грунта на контуре обделки. **Вывод.** На напряженное состояние существенное влияние оказывает степень анизотропии упругих свойств грунтового массива. При проектировании подземных сооружений необходимо учитывать анизотропию упругих свойств грунтового массива; детально определять физико-механические свойства скальных грунтов и особое внимание уделять упругим характеристикам. Учет трансверсально-изотропии ведет, как к увеличению, так и к уменьшению тангенциальных напряжений в обделке туннеля и в скальном грунте на контуре обделки. При некоторых отношениях упругих характеристик в ортогональных направлениях, в обделке и в грунте на контуре обделки, отсутствуют растягивающие напряжения, что благоприятно отражается на работе гидротехнического туннеля.

Ключевые слова: модуль деформации, коэффициент Пуассона, трансверсально-изотропная среда, туннели, обделка, теория упругости

TECHNICAL SCIENCE
BUILDING AND ARCHITECTURE

STRESSED CONDITION OF THE WRAPPING WITHOUT-DRIVE
HYDROTECHNICAL TUNNEL OF THE CIRCULAR FORM, PROPOSED
IN ANISOTROPIC ROCK GROUND

Damir T. Bautdinov¹, Magomed M. Djamaludinov², Kristina S. Zhukova³

¹Russian State Agrarian University - Moscow Timiryazev Agricultural Academy,

¹49 Timiryazevskaya Str., Moscow 127550, Russia,

²JSC «ChirkeyGESstroy»,

²18 Podstancionnaya Str., Pyatigorsk 357506, Russia,

³LLC RT – SotsStroy,

³23a Tarasa Shevchenko quay, Moscow 3121151, Russia,

¹e-mail: damir.tt1@mail.ru, ²e-mail: Djamaludinov86@mail.ru,

³e-mail: zhukova.kristina.sergeevna@yandex.ru

Abstract. Objectives The aim of the study is a parametric analysis of the stress-free lining of a pressureless hydraulic tunnel of circular section, and adjacent anisotropic rock from its own weight of the ground medium at different ratios of the elastic characteristics of the ground medium in orthogonal directions using a transversely isotropic medium model. **Method.** The calculation of a large-length hydraulic tunnel laid in strong transversely isotropic rocky ground is reduced to the problem of plane deformation of the theory of elasticity for a transversely isotropic medium containing tunnel development. A model of a transversely isotropic medium (a special case of an anisotropic medium) was used, in which the ground in one plane possesses the characteristics of an isotropic medium (the isotropy plane), and in the perpendicular direction, characteristics different from the isotropic medium. The finite element method was used using the ANSYS software package. The sizes and type of the finite element suitable for calculation on the basis of the solution in the program complex of the verification task were previously determined. The Kirsch problem was accepted as the verification problem. **Result.** The relative tangential stresses on the outer and inner lining contour, which allow reinforcement of the concrete lining at different depths of the tunnel, are determined. The tangential stresses in the adjacent rock massif are determined, allowing, if necessary, to assess the strength of the soil on the lining contour. **Conclusion.** The results of the study showed that the degree of anisotropy of the elastic properties of the soil massif significantly affects the stress state. When designing underground structures, it is necessary to take into account the anisotropy of the elastic properties of the soil mass; define in detail the physicomechanical properties of rocky soils and pay special attention to elastic characteristics. Accounting for transversal-isotropy leads to both an increase and a decrease in tangential stresses in the lining of the tunnel and in the rocky soil on the lining contour. In some respects, the elastic characteristics in orthogonal directions, in the lining and in the soil on the lining contour, there are no tensile stresses, which favorably affects the operation of the hydraulic tunnel.

Keywords: deformation modulus, Poisson's ratio, transversely isotropic medium, tunnels, lining, theory of elasticity

Введение. Одними из основных сооружений, входящих в состав гидроузлов, мелиоративных систем и систем водоснабжения, являются гидротехнические туннели.

Согласно существующим нормам [1], массивы скальных грунтов следует считать анизотропными при коэффициенте анизотропии более 1,5. При этом в нормах [2] указано, что для туннелей, располагаемых в анизотропных грунтах с отношением модулей деформации в разных направлениях более 1,4, расчеты необходимо выполнять с учетом анизотропии. Вышеизложенные требования свидетельствуют о том, что при расчете гидротехнических туннелей, проходящих в грунтах с выраженной анизотропией, модель изотропного тела не применима.

Постановка задачи. В данной работе проводится параметрический анализ напряженного состояния обделки туннеля и трансверсально-изотропного скального грунта, находящегося на контуре обделки туннеля круговой формы сечения, от собственного веса трансверсально-изотропного скального грунта, в зависимости от отношений упругих характеристик в ортогональных направлениях.

Методы исследования. Анизотропной называется среда, у которой наблюдаются различия в упругих характеристиках для различных направлений [10, 14, 16]. Для анизотропной среды число независимых упругих постоянных равно 21 [3, 8, 11], что затрудняет применение этой модели на практике. Широкое распространение получила модель трансверсально-изотропной среды (частный случай анизотропной среды), при которой грунт в одной плоскости обладает характеристиками изотропной среды (плоскость изотропии), а перпендикулярном направлении – отличными от изотропной среды характеристиками [6, 7] (рис. 1).

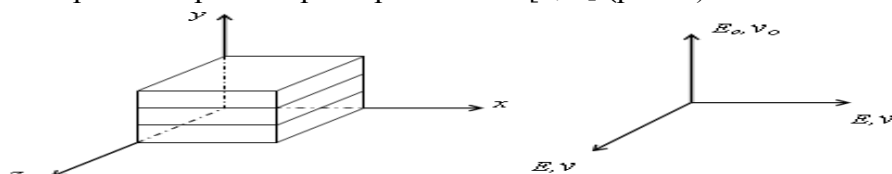


Рис. 1. Модель трансверсально-изотропной среды

Fig. 1. Model of transversely isotropic medium

где: $E=E_x=E_z$ – модуль деформации для растяжения-сжатия в направлении плоскости изотропии;

$E_o=E_y$ – модуль деформации для растяжения-сжатия в направлении, нормальном к плоскости изотропии;

$\nu=\nu_{zx}=\nu_{xz}$ – коэффициент Пуассона, характеризующий поперечное сжатие в плоскости изотропии при растяжении в плоскости изотропии;

$\nu_o=\nu_{xy}=\nu_{yz}$ – коэффициент Пуассона, характеризующий поперечное сжатие в плоскости нормальной к плоскости изотропии при растяжении в плоскости изотропии;

$G=G_{xz}$ – модуль сдвига в плоскости изотропии (ZOX) определяемый по известной зависимости (1),

$G_o=G_{xy}=G_{yz}$ – модуль сдвига в любой плоскости, перпендикулярной к плоскости изотропии (ZOX), который можно определить по формуле К. Вольфа (2) [3]:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \cdot \quad (1)$$

$$G_o = \frac{E \cdot E_o}{E + E_o (1 + 2\nu_o)} \cdot \quad (2)$$

Параметрический анализ выполнен методом конечных элементов с использованием программного комплекса ANSYS [13]. Предварительно были определены размер и тип элемента, пригодного для расчета по результатам решения верификационной задачи.

В качестве верификационной задачи была рассмотрена упругая изотропная среда, подверженная сжатию и содержащая круглую выработку. Для такой задачи имеется точное аналитическое решение Кирша [3]. Результаты расчетов с использованием программного комплекса ANSYS показали хорошее соответствие точному аналитическому решению (погрешность менее 1%).

В качестве расчетной схемы, моделирующей безнапорный гидротехнический туннель глубокого заложения круговой формы сечения с обделкой, проложенный в трансверсально-изотропном скальном грунте с различными отношениями упругих характеристик в ортогональных направлениях, была принята бесконечная упругая трансверсально-изотропная среда, содержащая выработку круговой формы, находящаяся в условиях плоской деформации [5, 12].

В качестве краевых условий на значительном удалении от выработки, рассматривалась вертикальная равномерно распределенная нагрузка сжатия, приложенная к горизонтальной гра-

нице расчетной области, моделирующая собственный вес грунта над туннелем. Также, вследствие того, что боковое расширение грунта невозможно [4, 15] на вертикальных границах расчетной области поставлены горизонтальные связи, препятствующие боковому расширению. Размеры расчетной области были минимизированы с учетом задания «активной зоны» (критерий Фролова М.И.). Внутренний контур обделки свободен от воздействия, что соответствует безнапорному гидротехническому туннелю.

Обделка туннеля была принята выполненной из бетона марки В25 с модулем упругости E_b и с коэффициентом Пуассона $\nu_b = 0,2$. Толщина обделки была принята в долях от радиуса туннеля $t = 0,2r$. Отношение модуля упругости в плоскости изотропии скального массива к модулю упругости бетона было принято $E = 0,5E_b$ [9]. Также задавались коэффициенты Пуассона: - $\nu = \nu_{xz} = \nu_{zx}$ в плоскости изотропии и $\nu_o = \nu_{xy} = \nu_{zy} = 0,1; 0,15; 0,2; 0,25; 0,3$ – в направлении нормальном к плоскости изотропии.

Расчетная схема с учетом вертикальной и горизонтальной симметрии представлена на рис. 2.

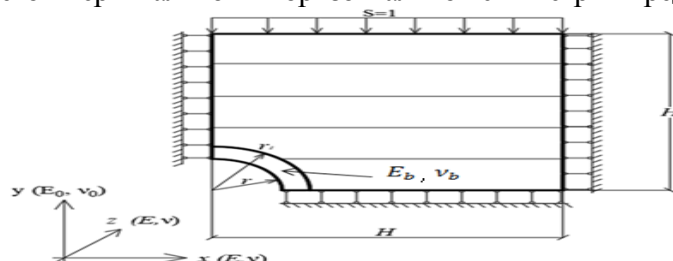


Рис. 2. Расчетная схема, моделирующая собственный вес грунта на туннель, по модели трансверсально-изотропной среды

Fig. 2. The design scheme that simulates the ground weight of the soil on the tunnel, according to the model of transversely isotropic medium

где, r – внутренний радиус бетонной обделки, r_1 – наружный радиус бетонной обделки, H – размер расчетной области ($H = 8r$).

Обсуждение результатов. Рассмотрим результаты расчета на единичную нагрузку от собственного веса грунта на безнапорный гидротехнический туннель с обделкой.

В процессе расчета задавались различные отношения упругих характеристик грунтовой среды в ортогональных направлениях. Зная относительные тангенциальные напряжения в обделке и в прилегающем скальном грунте, можно определить истинное напряженное состояние, умножив относительные тангенциальные напряжения на реальную величину нагрузки. Относительные тангенциальные напряжения на внутреннем и внешнем контуре обделки, а также в трансверсально-изотропном скальном массиве на контуре обделки туннеля от собственного веса трансверсально-изотропного грунта с учетом вертикальной и горизонтальной симметрии определялись в сечениях, представленных на рис. 3.

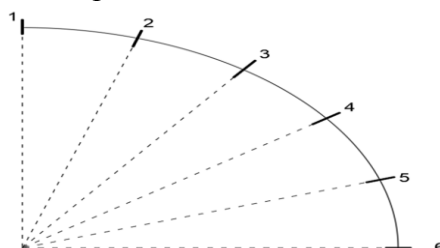


Рис. 3. Сечения, в которых определялись относительные тангенциальные напряжения

Fig. 3. Sections in which relative tangential stresses were determined

На рис. 4 и рис.5 приведены эпюры относительных тангенциальных напряжений на внешнем и внутреннем контуре обделки и в скальном массиве на контуре обделки туннеля для случая изотропии соответственно. Из рис.4 и из рис.6 видно, что наибольшие относительные тангенциальные растягивающие напряжения на внутреннем контуре бетонной обделки в верхнем сечении при учете трансверсальной изотропии уменьшились более чем в 2 раза с 0,764 до 0,334 (табл. 1).

На рис. 6 и рис.7 приведены эпюры относительных тангенциальных напряжений на внешнем и внутреннем контуре обделки и в скальном массиве на контуре обделки туннеля для случая

трансверсальной–изотропии при $E/E_0=1,5, \nu_0/\nu=2$, от собственного веса трансверсально-изотропного грунта.

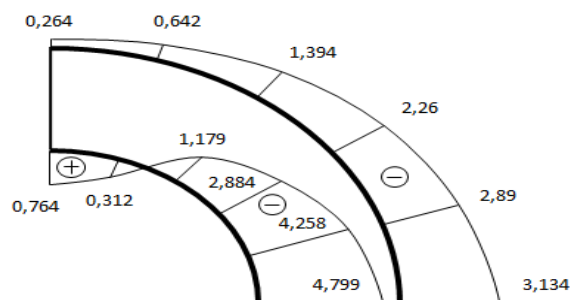


Рис. 4. Эпюра относительных тангенциальных напряжений на внутреннем и внешнем контуре бетонной обделки от собственного веса изотропного грунта

Fig. 4. Plot of relative tangential stresses on the internal and external contour of the concrete lining from its own weight of isotropic soil

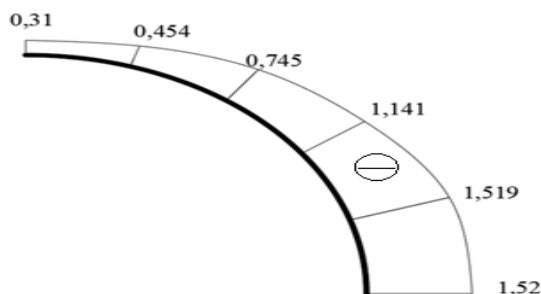


Рис. 5. Эпюра относительных тангенциальных напряжений в скальном массиве на контуре обделки туннеля от собственного веса изотропного грунта

Fig. 5. Plot of relative tangential stresses in the rock mass on the tunnel lining contour due to its own weight of isotropic soil

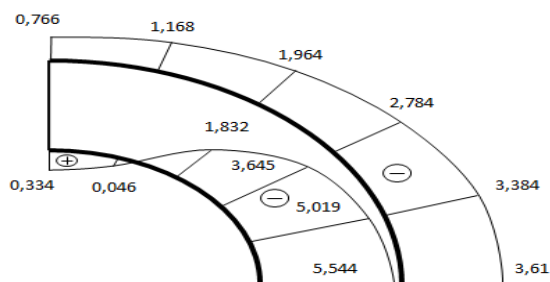


Рис. 6. Эпюра относительных тангенциальных напряжений на внутреннем и внешнем контуре бетонной обделки от собственного веса трансверсально-изотропного грунта при: $\nu_0/\nu = 2$; $E/E_0 = 1,5$

Fig. 6. The plot of the relative tangential stresses on the internal and external contour of the concrete lining of its own weight transversely isotropic soil with: $\nu_0 / \nu = 2$; $E / E_0 = 1.5$

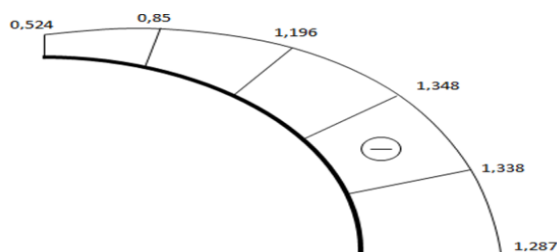


Рис. 7. Эпюра относительных тангенциальных напряжений в скальном массиве от собственного веса трансверсально - изотропного грунта при: $\nu_0/\nu = 2$; $E/E_0 = 1,5$

Fig. 7. Plot of relative tangential stresses in the rock mass of its own weight transversely - isotropic soil with: $\nu_0 / \nu = 2$; $E / E_0 = 1.5$

Таблица 1. Относительные тангенциальные напряжения в скальном грунте на контуре обделки, в зависимости от отношений упругих характеристик в ортогональных направлениях
Table 1. Relative tangential stresses in rocky soil on the lining contour, depending on the relationship of elastic characteristics in orthogonal directions

ν_0/ν № сеч.	1	1,5	2	2,5	3
E/E ₀ =1					
1	-0,31	-0,363	-0,403	-0,452	-0,514
2	-0,454	-0,699	-0,723	-0,75	-0,78
3	-0,745	-1,134	-1,139	-1,146	-1,155
4	-1,141	-1,412	-1,412	-1,416	-1,423
5	-1,519	-1,523	-1,532	-1,545	-1,564
6	-1,52	-1,532	-1,548	-1,569	-1,597
E/E ₀ =1,5					
1	-0,446	-0,482	-0,524	-0,576	-0,638
2	-0,811	-0,831	-0,85	-0,871	-0,894
3	-1,198	-1,197	-1,196	-1,197	-1,199
4	-1,359	-1,352	-1,348	-1,349	-1,354
5	-1,327	-1,329	-1,338	-1,353	-1,376
6	-1,25	-1,265	-1,287	-1,316	-1,353
E/E ₀ =2					
1	-0,551	-0,589	-0,635	-0,689	-0,748
2	-0,908	-0,925	-0,941	-0,956	-0,972
3	-1,232	-1,228	-1,223	-1,22	-1,217
4	-1,319	-1,31	-1,305	-1,303	-1,307
5	-1,216	-1,217	-1,225	-1,239	-1,265
6	-1,081	-1,099	-1,125	-1,16	-1,205
E/E ₀ =2,5					
1	-0,647	-0,689	-0,738	-0,79	-0,845
2	-0,982	-0,996	-1,008	-1,018	-1,027
3	-1,251	-1,244	-1,237	-1,23	-1,224
4	-1,293	-1,282	-1,275	-1,273	-1,276
5	-1,152	-1,15	-1,155	-1,168	-1,195
6	-0,97	-0,988	-1,015	-1,053	-1,107
E/E ₀ =3					
1	-0,736	-0,781	-0,83	-0,881	-0,929
2	-1,038	-1,049	-1,058	-1,064	-1,066
3	-1,262	-1,253	-1,244	-1,235	-1,225
4	-1,276	-1,264	-1,255	-1,251	-1,255
5	-1,115	-1,11	-1,111	-1,122	-1,149
6	-0,906	-0,918	-0,94	-0,979	-1,039

Из табл.1 видно, что при увеличении отношений модулей деформации относительные тангенциальные сжимающие напряжения в грунте на контуре туннеля в верхнем сечении возрастают, а в боковом сечении уменьшаются по сравнению со случаем изотропии. При увеличении отношений коэффициентов Пуассона относительные тангенциальные сжимающие напряжения в грунте на контуре туннеля в верхнем сечении возрастают, а в боковом сечении растут незначительно по сравнению с напряжениями для случая изотропии. Относительные тангенциальные сжимающие напряжения на внешнем контуре бетонной обделки возрастают, по сравнению с напряжениями в случае изотропии с 0,264 до 0,766. Относительные тангенциальные сжимающие напряжения в грунте на контуре обделки туннеля (рис.7) в верхнем сечении с учетом трансверсальной изотропии возрастают, по сравнению с напряжениями в случае изотропии (рис.5) с 0,31 до 0,524. (табл. 2).

В боковом сечении в бетонной обделке и в грунте преобладают тангенциальные сжимающие напряжения. В бетонной обделке, с учетом трансверсальной изотропии, сжимающие напряжения возрастают по сравнению с напряжениями в случае изотропии - на внутреннем контуре с 4,799 до 5,544, на внешнем контуре с 3,134 до 3,61, а в грунте, наоборот, уменьшаются с 1,52 до 1,287. На рис. 8 и рис.9 приведены эпюры относительных тангенциальных напряжений на внешнем и внутреннем контуре обделки и в скальном массиве на контуре обделки туннеля для случая трансверсальной изотропии при $E/E_0=2$, $\nu_0/\nu=1$, от собственного веса трансверсально-изотропного грунта соответственно.

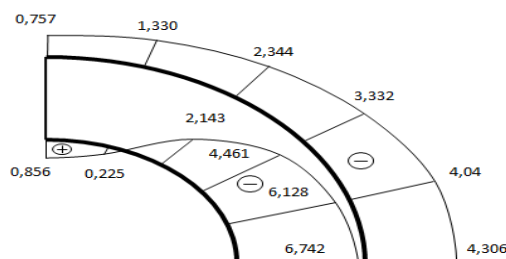


Рис. 8. Эпюра относительных тангенциальных напряжений на внутреннем и внешнем контуре бетонной обделки от собственного веса трансверсально-изотропного грунта при $\nu_0/\nu=1$; $E/E_0=2$

Fig. 8. Plot of relative tangential stresses on the internal and external contour of the concrete lining from its own weight of transversely isotropic soil with $\nu_0/\nu = 1$; $E/E_0 = 2$

Из рис.8 видно, что относительные растягивающие напряжения на внутреннем контуре бетонной обделки в верхнем сечении с учетом трансверсальной изотропии возросли по сравнению со случаем изотропии с 0,764 до 0,856. Относительные тангенциальные сжимающие напряжения на внешнем контуре бетонной обделки возрастают, по сравнению с напряжениями в случае изотропии с 0,264 до 0,757.

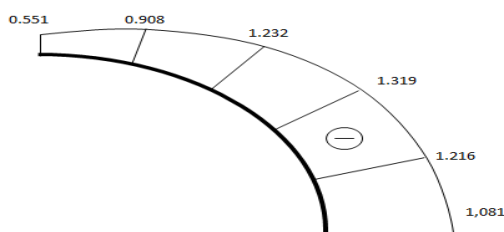


Рис. 9. Эпюра относительных тангенциальных напряжений в скальном массиве от собственного веса трансверсально-изотропного грунта при $\nu_0/\nu=1$; $E/E_0=2$

Fig. 9. Plot of relative tangential stresses in the rock mass due to its own weight of transversely isotropic soil at $\nu_0/\nu = 1$; $E/E_0 = 2$

Относительные тангенциальные сжимающие напряжения в грунте на контуре обделки туннеля (рис.9) в верхнем сечении с учетом трансверсальной изотропии возрастают, по сравнению с напряжениями в случае изотропии с 0,31 до 0,551 (табл.2). В боковом сечении в бетонной обделке и в грунте, также преобладают тангенциальные сжимающие напряжения. В бетонной обделке, с учетом трансверсальной изотропии, эти сжимающие напряжения возрастают по сравнению с напряжениями в случае изотропии – на внутреннем контуре с 4,799 до 6,742, на внешнем контуре с 3,134 до 4,306, а в грунте, наоборот, уменьшаются с 1,52 до 1,081. В табл. 1 и табл. 2 представлены значения относительных тангенциальных напряжений от собственного веса трансверсально - изотропного грунта в сечениях, представленных на рис. 3, на внешнем и внутреннем контуре бетонной обделки, а также в трансверсально изотропном грунте на контуре обделки туннеля в зависимости от отношения упругих характеристик в ортогональных направлениях (рис.1).

Таблица 2. Относительные тангенциальные напряжения на внутреннем и внешнем контуре бетонной обделки туннеля в зависимости от отношения упругих характеристик

Table 2. Relative tangential stresses on the inner and outer contour of the concrete lining of the tunnel depending on the ratio of elastic characteristics

№ сеч.	внутренний контур	внешний контур
--------	-------------------	----------------

	1	1,5	2	2,5	3	1	1,5	2	2,5	3
	E/E ₀ =1					E/E ₀ =1				
1	0,764	0,52	0,286	0,054	-0,191	-0,264	-0,369	-0,514	-0,657	-0,796
2	0,312	0,153	0,047	-0,378	-0,555	-0,642	-0,739	-0,835	-0,934	-1,033
3	-1,179	-1,27	-1,364	-1,45	-1,533	-1,394	-1,465	-1,504	-1,54	-1,573
4	-2,884	-2,87	-2,852	-2,82	-2,779	-2,26	-2,248	-2,23	-2,205	-2,175
5	-4,258	-4,16	-4,049	-3,92	-3,783	-2,89	-2,839	-2,776	-2,706	-2,629
6	-4,799	-4,669	-4,523	-4,363	-4,186	-3,135	-3,063	-2,983	-2,896	-2,801
	E/E ₀ =1,5					E/E ₀ =1,5				
1	0,826	0,581	0,334	0,089	-0,176	-0,484	-0,627	-0,766	-0,898	-1,025
2	0,269	0,134	0,046	-0,495	-0,67	-0,933	-1,082	-1,168	-1,251	-1,33
3	-1,686	-1,764	-1,832	-1,892	-1,944	-1,918	-1,945	-1,964	-1,975	-1,979
4	-3,745	-3,704	-3,645	-3,567	-3,472	-2,858	-2,827	-2,784	-2,731	-2,666
5	-5,303	-5,172	-5,019	-4,84	-4,639	-3,546	-3,471	-3,384	-3,284	-3,17
6	-5,894	-5,731	-5,544	-5,33	-5,092	-3,805	-3,714	-3,61	-3,493	-3,362
	E/E ₀ =2					E/E ₀ =2				
1	0,856	0,6	0,342	0,085	-0,199	-0,757	-0,893	-1,021	-1,139	-1,248
2	0,225	0,112	0,039	-0,622	-0,794	-1,33	-1,41	-1,482	-1,546	-1,601
3	-2,143	-2,202	-2,247	-2,276	-2,292	-2,344	-2,356	-2,354	-2,338	-2,308
4	-4,461	-4,389	-4,289	-4,163	-4,007	-3,332	-3,284	-3,218	-3,134	-3,031
5	-6,128	-5,389	-5,767	-5,536	-5,266	-4,04	-3,948	-3,837	-3,706	-3,554
6	-6,742	-6,546	-6,317	-6,05	-5,742	-4,306	-4,198	-4,071	-3,923	-3,753
	E/E ₀ =2,5					E/E ₀ =2,5				
1	0,864	0,599	0,33	0,063	-0,241	-1,027	-1,154	-1,266	-1,366	-1,453
2	0,189	0,094	0,029	-0,747	-0,915	-1,649	-1,718	-1,773	-1,813	-1,841
3	-2,554	-2,594	-2,612	-2,608	-2,583	-2,716	-2,712	-2,687	-2,642	-2,576
4	-5,07	-4,967	-4,826	-4,647	-4,426	-3,721	-3,654	-3,564	-3,449	-3,307
5	-6,802	6,607	-6,366	-6,077	-5,736	-4,43	-4,322	-4,186	-4,025	-3,832
6	-7,426	-7,199	-6,926	-6,603	-6,222	-4,699	-4,574	-4,424	-4,244	-4,033
	E/E ₀ =3					E/E ₀ =3				
1	0,861	0,585	0,307	0,034	-0,295	-1,289	-1,402	-1,498	-1,575	-1,637
2	0,162	0,078	0,02	-0,864	-1,028	-1,952	-2,007	-2,041	-2,056	-2,051
3	-2,925	-2,944	-2,933	-2,893	-2,823	-3,044	-3,023	-2,974	-2,897	-2,792
4	-5,598	-5,464	-5,279	-5,044	-4,752	-4,044	-3,962	-3,847	-3,699	-3,515
5	-7,37	-7,142	-6,857	-6,508	-6,089	-4,749	-4,624	-4,466	-4,271	-4,035
6	-7,995	-7,737	-7,42	-7,037	-6,579	-5,015	-4,875	-4,701	-4,489	-4,235

Из табл. 2 видно, что относительные тангенциальные растягивающие напряжения на *внутреннем* контуре обделки в верхнем сечении при увеличении отношений модулей деформации возрастают, а при увеличении отношений коэффициентов Пуассона уменьшаются по сравнению со случаем изотропии. На *внешнем* контуре обделки в верхнем сечении относительные тангенциальные сжимающие напряжения возрастают как при увеличении отношений модулей деформаций, так и при увеличении отношений коэффициентов Пуассона. В боковом сечении от-

носительные тангенциальные сжимающие напряжения на *внешнем* и *внутреннем* контуре обделки возрастают при увеличении отношений модулей деформаций, и уменьшаются при увеличении отношений коэффициентов Пуассона.

Следует отметить, что можно найти такие отношения упругих характеристик, при которых в бетонной обделке на внешнем и внутреннем контуре возникают только относительные тангенциальные сжимающие напряжения, что благоприятным образом отражается на работе бетонной обделки и туннеля в целом.

Вывод. Результаты параметрического анализа напряженного состояния обделки безнапорного гидротехнического туннеля и прилегающего к внешнему контуру обделки скального массива показывают, что на напряженное состояние существенное влияние оказывает степень анизотропии упругих свойств грунтового массива. При проектировании подземных сооружений необходимо учитывать анизотропию упругих свойств грунтового массива. Необходимо более детально определять физико-механические свойства скальных грунтов, и особое внимание уделять упругим характеристикам. Как показали проведенные исследования, учет трансверсальной-изотропии ведет как к увеличению, так и к уменьшению тангенциальных напряжений в обделке туннеля и в скальном грунте на контуре обделки. При некоторых отношениях упругих характеристик в ортогональных направлениях, в обделке и в грунте на контуре обделки, отсутствуют растягивающие напряжения, что благоприятно отражается на работе гидротехнического туннеля.

Библиографический список:

1. СНиП 2.02.02-85*. Основания гидротехнических сооружений: утв. Госстроем СССР 12.12.85[ред. 30.06.2003]. – М.: Госстрой СССР, 1985. – 67 с.
2. СНиП 2.06.09-84. Туннели гидротехнические: утв. Госстроем СССР 14.11.84: взамен СН 238-73. – М.: Госстрой СССР, 1985. – 28 с.
3. Лехницкий С.Г. Теория упругости анизотропного тела/ С.Г. Лехницкий. – М.: Наука, 1977. – 416 с.
4. Цытович Н.А. Механика грунтов / Н.А. Цытович. – М.: Высш. шк., 1983. 288 с.
5. Баутдинов Д.Т. Конечный-элементный анализ гидротехнических туннелей без обделки, проложенных в трансверсально-изотропных скальных грунтах. Дисс... канд. тех. наук. М.-2012. -175с.
6. Баутдинов Д.Т. Исследование напряженного состояния трансверсально-изотропного скального грунта вблизи гидротехнического туннеля круговой формы сечения. //Приволжский научный журнал.- 2011.- № 3. - С. 93-98.
7. Фролов М.И., Баутдинов Д.Т., Боев. Ю.А. Системный анализ напряженного состояния гидротехнических сооружений. М.: Институт СНГ, 2012. -392с. - с.365 - 388.
8. Фролов М.И. Теория упругости и упруго-пластичности в перемещениях. – М. Институт СНГ. -2012.-166с.
9. Д.П. Прочухан, С.А. Фрид, Л.К. Доманский. Скальные основания гидротехнических сооружений. – Л.: Стройиздат, 1971.-190с.
10. Баутдинов Д.Т., Джамалудинов М.М. Напряженное состояние скального грунта вблизи гидротехнического туннеля круговой формы сечения с учетом анизотропии грунтовой среды. // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки.- 2016.- № 4. – С. 144-152.
11. Li, J.C., Li, H.B., Ma, G.W., Zhou, Y.X., 2013. Assessment of underground tunnel stability to adjacent tunnel explosion. Tunnel. Underground Space Technol. 35, 227–234.
12. Jiang, N., Zhou, C., 2012. Blasting vibration safety criterion for a tunnel linear structure. Tunnel. Underground Space Technol. 32, 52–57.
13. ANSYS, 2009. User Manual Version 12. ANSYS Inc. AUTODYN, 2009. User Manual Version 12.
14. Voytenko I.V. Influence of cohesion on parameters of the heterogeneous anisotropic soil active pressure, Tehnički glasnik 9, 1(2015), 35-39.
15. Ayberk Kaya, Fikri Bulut, Selçuk Alemdag and Aytuna Sayin. Analysis of support requirements for a tunnel portal in weak rock: A case study from Turkey, Scientific Research and Essays Vol. 6(31), pp. 6566-6583, 16 December, 2011. DOI: 10.5897/SRE11.1691.
16. Y. Zhou, J. Zhao. Assessment and planning of underground space use in Singapore, Tunnelling and Underground Space Technology 55, 3(2016) 249-256. DOI: 10.1016/j.tust.2015.12.018

References:

- 1.SNiP 2.02.02-85*. Osnovaniya gidrotekhnicheskikh sooruzheniy: utv. Gosstroyem SSSR 12.12.85[red. 30.06.2003]. – М.: Gosstroy SSSR, 1985. – 67 s. [SNiP 2.02.02-85 *. The foundations of hydraulic structures: approved. State Construction Committee of the USSR 12.12.85 [ed. 30.06.2003]. - M.: Gosstroy USSR, 1985. - 67 p. (in Russ)]
- 2.SNiP 2.06.09-84. Tunneli gidrotekhnicheskkiye: utv. Gosstroyem SSSR 14.11.84: vzamen SN 238-73. – М.: Gosstroy SSSR, 1985. – 28 s. [SNiP 2.06.09-84. Hydrotechnical tunnels: approved. State Construction Committee of the USSR 11/14/84: instead of SN 238-73. - M.: Gosstroy USSR, 1985. - 28 p. (in Russ)]
- 3.Lekhnitskiy S.G. Teoriya uprugosti anizotropnogo tela/ S.G. Lekhnitskiy. – М.: Nauka, 1977. – 416 s. [Lekhnitsky S.G. Theory of elasticity of anisotropic body / S.G. Lekhnitsky. - M.: Science, 1977. - 416 p. (in Russ)]

4. Tsytovich N.A. Mekhanika gruntov / N.A. Tsytovich. – M.: Vyssh. shk, 1983. 288 s. [Tsytovich N.A. Soil mechanics / N.A. Tsytovich. - M.: Higher. MK, 1983. 288 p. (in Russ)]
5. Bautdinov D.T. Konechno-elementnyy analiz gidrotekhnicheskikh tunney bez obdelki, prolozhennykh v transversal'no-izotropnykh skal'nykh gruntakh. Diss... kand. tekhn. nauk. M.-2012. -175s. [Bautdinov D.T. Finite element analysis of hydraulic tunnels without lining, laid in transversely isotropic rocky soils. Diss ... Cand. those. sciences. M.-2012. -175p. (in Russ)]
6. Bautdinov D.T. Issledovaniye napryazhennogo sostoyaniya transversal'no-izotropnogo skal'nogo grunta vblizi gidrotekhnicheskogo tunnelya krugovoy formy secheniya. //Privolzhskiy nauchnyy zhurnal.- 2011.- № 3. - S. 93-98. [Bautdinov D.T. Investigation of the stress state of transversely isotropic rock soil near the hydraulic tunnel of circular section shape. // Volga scientific journal .- 2011.- № 3. - pp. 93-98. (in Russ)]
7. Frolov M.I., Bautdinov D.T., Boyev. YU.A. Sistemnyy analiz napryazhennogo sostoyaniya gidrotekhnicheskikh sooruzheniy. M.: Institut SNG, 2012. -392s. - s.365 - 388. [Frolov M.I., Bautdinov D.T., Fights. Yu.A. System analysis of the stress state of hydraulic structures. M.: CIS Institute, 2012. -392c. - p.365 - 388. (in Russ)]
8. Frolov M.I. Teoriya uprugosti i uprugo-plastichnosti v peremeshcheniyakh. – M. Institut SNG. -2012.-166s. [Frolov M.I. The theory of elasticity and elastic-plasticity in displacements. - M. CIS Institute. -2012.-166p. (in Russ)]
9. D.P. Prochukhan, S.A. Frid, L.K. Domanskiy. Skal'nyye osnovaniya gidrotekhnicheskikh sooruzheniy. – L.: Stroyizdat, 1971.-190s. [D.P. Prochukhan, S.A. Fried, L.K. Domansky. Rocky foundations of hydraulic structures. - L.: Stroyizdat, 1971.-190p. (in Russ)]
10. Bautdinov D.T., Dzhamaaludinov M.M. Napryazhennoye sostoyaniye skal'nogo grunta vblizi gidrotekhnicheskogo tunnelya krugovoy formy secheniya s uchetom anizotropii gruntovoy sredy//Vestnik Daghestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskkiye nauki.- 2016.- № 4. – S. 144-152. [Bautdinov D.T., Jamaludinov M.M. The stress state of the rocky soil near the hydraulic tunnel of circular sectional shape, taking into account the anisotropy of the soil environment. // Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences .- 2016.- № 4. - pp. 144-152. (in Russ)]
11. Li, J.C., Li, H.B., Ma, G.W., Zhou, Y.X., 2013. Assessment of the underground tunnel. Tunnel. Underground Space Technol. 35, 227–234.
12. Jiang, N., Zhou, C., 2012. Blasting vibration safety criterion for a tunnel linear structure. Tunnel. Underground Space Technol. 32, 52–57.
13. ANSYS, 2009. User Manual Version 12. ANSYS Inc. AUTODYN, 2009. User Manual Version 12.
14. Voytenko I.V. Influence of cohesion on the parameters of heterogeneous soil pressure, *Tekhnicheskii glasnik* 9, 1 (2015), 35-39.
15. Ayberk Kaya, Fikri Bulut, Selçuk Alemdag and Aytuna Sayin. An analysis of the requirements for a weak portal: A case study from Turkey, Vol. 6 (31), pp. 6566-6583, 16 De-cember, 2011. DOI: 10.5897 / SRE11.1691.
16. Y. Zhou, J. Zhao. Assessment and planning of underground space use in Singapore, *Tunneling and Underground Space Technology* 55, 3 (2016) 249-256. DOI: 10.1016 / j.tust.2015.12.018

Сведения об авторах:

Баудинов Дамир Тахирович – кандидат технических наук, доцент, кафедра «Инженерные конструкции».

Джамалудинов Магомед Магомеднабиевич – ведущий инженер отдела капитального строительства.

Жукова Кристина Сергеевна – главный специалист.

Information about the authors:

Damir T. Bautdinov - Cand. Sci. (Technical), Assoc. Prof., Department of «Engineering Design».

Magomed M. Djamaludinov – Leading engineer of Capital construction.

Kristina S. Zhukova—Chief Specialist.

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 14.07.2018.

Принята в печать 23.09.2018.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 14.07.2018.

Accepted for publication 23.09.2018.

Для цитирования: Батманов Э.З., Гасанов Т.Г., Гусейнов М.Р. Моделирование процесса резания минеральных грунтов пассивным рабочим органом дреноукладчика при строительстве закрытого дренажа. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2018;45 (3):165-174. DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-3-165-174

For citation: Batmanov E.Z., Gasanov T.G., Guseynov M.R. Modeling of the process of cutting mineral grounds by passive working drawner during the construction of closed drainage. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2018; 45(3):165-174. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-3-165-174

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

УДК 628.844

DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-3-165-174

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ ГРУНТОВ ПАССИВНЫМ РАБОЧИМ ОРГАНОМ ДРЕНОУКЛАДЧИКА ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ЗАКРЫТОГО ДРЕНАЖА

Батманов Э.З.¹, Гасанов Т.Г.², Гусейнов М.Р.³

¹⁻³Дагестанский государственный технический университет,

¹⁻³367026, г.Махачкала, пр. И. Шамиля, 70, Россия,

¹e-mail:batmanov1978@mail.ru,²e-mail:Gasanov@mail.ru,³e-mail:Maratdgtu@mail.ru

Резюме. Цель. В статье описывается электронная модель почвогрунта для изучения его реологических свойств и исследования процесса резания пассивными рабочими органами (ножами) минеральных грунтов при бестраншейном способе строительства закрытого дренажа.

Метод. Сущность способа заключается в прорезании в грунте с помощью пассивного рабочего органа узкой щели под заданный уклон и одновременной закладке на ее дно дренажной (обычно пластмассовой) трубы с фильтром.

Результат. Бестраншейный способ характеризуется возможностью укладки труб на больших скоростях, простотой конструкции дренажных машин и, что особенно важно, возможностью строительства дренажа в водонасыщенных и обрушающихся минеральных грунтах. Большим преимуществом является возможность применения дренажной машины при бестраншейном способе в условиях малых уклонов при достаточной длине укладываемых дрен. **Вывод.** Исследование процесса резания минеральных грунтов узкими глубокими ножами на электронной модели позволяет на стадии проектирования оценить влияние изменения различных факторов и параметров на режимы работы дренажной машины; внести при необходимости изменения в комплекс работ по строительству дренажа бестраншейным способом с помощью дреноукладчика БДМ-300, а также определить состав и продолжительность операций рабочего цикла бестраншейного дреноукладчика.

Ключевые слова: рабочий орган, почвогрунт, тело Бингама, критическое напряжения, реологическая модель, процесс резания, зернистая среда, одноосное сжатие, закон Гука, модель генератора

TECHNICAL SCIENCE
BUILDING AND ARCHITECTURE

MODELING OF THE PROCESS OF CUTTING MINERAL GROUNDS BY PASSIVE
WORKING DRAWNER DURING THE CONSTRUCTION OF CLOSED DRAINAGE

Edvard Z. Batmanov¹, Telman G. Gasanov², Marat R. Guseynov³

¹⁻³Daghestan State Technical University,

¹⁻³70 I. Shamilya Ave., Makhachkala 367026, Russia,

¹e-mail: batmanov1978@mail.ru, ²e-mail: Gasanov@mail.ru, ³e-mail: Maratdgtu@mail.ru

Abstract. Objectives. The article describes an electronic model of the soil to study its rheological properties and study the process of cutting passive working bodies (knives) of mineral soils with trenchless method of building a closed drainage. **Method.** The essence of the method consists in cutting through the ground with the help of a passive working body of a narrow slit under a given slope and simultaneously laying a drainage (usually plastic) pipe with a filter on its bottom. **Result.** The trenchless method is characterized by the possibility of laying pipes at high speeds, the simplicity of the design of drainage machines and, most importantly, the possibility of building drainage in water-saturated and collapsing mineral soils. A big advantage is the possibility of using a drainage machine with a trenchless method in conditions of small slopes with a sufficient length of stacked drains. **Conclusion.** The study of the process of cutting mineral soils with narrow, deep knives on an electronic model makes it possible, at the design stage, to evaluate the effect of changes in various factors and parameters on the operating modes of the drainage machine; if necessary, make changes to the complex of works on the construction of drainage using the trenchless method with the help of the BDM-300 bed-draining machine, as well as to determine the composition and duration of the work operations of the trench-free bed-draining machine.

Keywords: working body, soil, Bingham body, critical stress, rheological model, cutting process, granular medium, uniaxial compression, Hooke's law, generator model

Введение. Исследованиями установлена техническая и экономическая эффективность бестраншейного способа строительства закрытого дренажа [1-10]. Было также установлено, что конструкция пассивного рабочего органа бестраншейной дренажной машины должна отвечать ряду требований, обусловленных энергетическими, технологическими и чисто мелиоративными факторами. При этом наиболее существенным является обеспечение наименьшего тягового сопротивления при отсутствии перегрузок ходовой системы базового трактора.

Анализ движения гусеничной машины по неровностям поверхности земли показал, что с помощью выведенных уравнений можно описать колебания движущейся машины и определить возникающие перемещения, скорости и ускорения жёстко навешиваемого рабочего органа в зависимости от его веса, длины и ширины гусениц, положения центра тяжести, физико-механических свойств грунта (коэффициентов деформируемости), реактивных сил сопротивления движению рабочего органа, поступательной скорости движения, неровностей поверхности земли [4-11]. При этом необходимо учитывать, что эффективное снижение значений показателей колебаний рабочего органа может быть достигнуто с помощью плавающей навески. Навеска землеройного рабочего органа дренажной машины БДМ-300 на трактор ДЭТ-250 выполнена таким образом, что при изменении глубины изменяется как угол резания ножа в зоне скалывания, так и угол резания в зоне уплотнения (так называемая маятниковая навеска).

Комплекс работ по строительству дренажа бестраншейным способом состоит из шести последовательных технологических циклов:

1. Планировка под заданный уклон пути движения дреноукладчика по трассе будущей дрени, называемая чаще устройством корыта (при глубине укладки дрени свыше 2,5 м, до 2,5 м выдерживание уклона дрени осуществляется с помощью автоматической системы).

2. Устройство заходного шурфа для беспрепятственного опускания рабочего органа дре-ноукладчика на требуемую глубину в начале трассы.
3. Укладка дренажных труб и фильтра.
4. Уплотнение разрыхленного грунта над щелью с целью ее закрытия.
5. Цикл работ по устройству сооружений.
6. Обратная засыпка корыта.

При расчете комплекта машин, необходимого для поточного строительства дренажа бес-траншейным способом, общей единицей измерения производительности можно применять пог.м. за смену. В этих единицах выражается производительность ведущей машины – бестран-шейного дреноукладчика, а также выход готовой продукции.

Постановка задачи. Расчет рабочих органов землеройных машин должен основываться на знании механических свойств грунтов, которые характеризуют его способность сопротив-ляться различным деформациям и разрушению. Это так называемые реологические свойства, показателями которых являются коэффициенты тензорных уравнений, связывающих напряже-ния, деформации и их производные по времени.

Методы исследования. Под разрушением грунта понимают потерю его несущей способ-ности не только в результате распада на отдельные части, но и вследствие неспособности более сопротивляться пластическому течению. Решая задачи, связанные с разрушением грунта, его фи-зико-механические свойства рассматриваются главным образом в той мере, в какой они влияют на реологические свойства. Одной из основных задач при этом является построение реологиче-ской модели почвогрунта и нахождение соответствующих констант и параметров ее.

Процесс резания, осуществляемый дренажной машиной БДМ-300, происходит в грунтах, реологическая модель которых может быть составлена на основе теоретических концепций, из-ложенных в работе А.А.Вовк и др. [1]. Модель грунта предложено представлять в виде зернистой среды, промежутки между частицами которой заполнены водой и газом, причем между отдель-ными блоками этой среды имеется статистическая совокупность упругохрупких связей.

Упругая деформация минеральных частиц происходит при всестороннем сжатии, созда-ваемом давлением воды и газа в порах. При динамическом нагружении поровое пространство закрывается, преодолевая параллельно действующие в нем силы: сжатие газа и воды, силы тре-ния между частицами-блоками, силы сопротивления упруго-хрупких кристаллизационных свя-зей между блоками, разрушающимися по статистическому закону.

В связи с вышеизложенным в основу модели почвогрунта (рис.1) положено тело Бингама, которое при сдвиге до некоторого критического напряжения K остается упругим и твердым; за-тем происходит полное разрушение его структуры, и оно начинает течь, как Ньютоновская жид-кость при напряжениях.

Однако модель Бингама не отражает всей совокупности процессов, происходящих в грун-тах при резании, поэтому она усложнена.

Для учета статистической совокупности упруго-хрупких связей в модель введены сопро-тивления (3) в виде упруго-хрупких стержней, работающих на изгиб и ломающихся по мере раз-вития деформации. Принято, что расстояние между стержнями, число которых достаточно мало и что упругость стержней, а также величина критической упругости (критической упругостью будем считать значение упругости, превышение которой ведут к излому стержня) есть случай-ные функции, подчиняющиеся нормальному закону распределения. Для учета пластических свойств грунта, которые отличаются от аналогичных свойств тела Бингама, в модель введен эле-мент сухого трения (2), сопротивление которых возрастает с развитием объемной деформации.

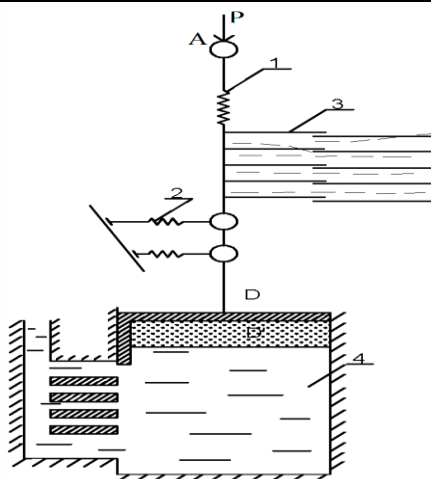


Рис.1. Реологическая модель грунтовой массы
Fig.1. Rheological model of ground mass

Критической упругостью будем считать значение упругости, превышение которой ведут к излому стержня. Для учета процессов, происходящих с жидкой и газообразной фазой в процессе резания, в модель введен сосуд (4), закрытый подвижным поршнем, соединенный жестко с элементом (1), отображающим упругие свойства твердых частиц грунта. Часть сосуда, закрытого подвижным поршнем, отвечающая свободному объему пор $\alpha_3 V$, заполнена политропическим газом. Нижняя часть сосуда заполнена вязкой жидкостью, имеет боковые отверстия, через которые жидкость вытекает из сосуда. Количество ее сокращается с развитием объемной деформации грунта.

Реологическая модель грунта (рис. 1) учитывает деформирование элементарного объема с учетом изменения соотношения фаз и скелетных связей. В соответствии с реологической моделью определяется связь между напряжениями и изменениями элементарного объема при одноосном сжатии. Уравнения, описывающие работу каждого элемента модели, определяют соотношения между нагрузкой, действующей на этот элемент, соответствующей напряжению в среде, и смещением, соответствующим деформации.

Упругий элемент характеризуется законом Гука, записываемого для данного случая формулой:

$$\frac{dV_1}{dp} = \frac{1}{K}, \quad (1)$$

где V_1 - модель минеральных частиц; K – коэффициент пропорциональности при объемной деформации минералов скелета грунта.

Пластический элемент (2) характеризуется законом сухого трения при линейно возрастающей величине нормальной нагрузки

$$\frac{dp_3}{dV_3} = \alpha_1 \varphi \Delta V \quad \Delta V = V_3 - \alpha_3 V_0 \quad (2)$$

где V_3 - удельный объем свободных пор; φ – коэффициент трения; V_0 - первоначальный объем грунта до деформации; α_3 - содержание газообразной фазы в единице объема.

Вязкий элемент (3) определяется законом вязкости течения:

$$P_n = -\mu \frac{dV_2}{dt}, \quad (3)$$

где V_2 - объем заполненных водой пор; μ – коэффициент вязкости, определяемый соотношением:

$$\mu = \mu(V) = \mu_0 \left(1 + \frac{V_0}{V}\right)$$

Сила сопротивления каждого стержня из серии упруго-хрупких элементов (3) до разрушения стержня определяется законом Гука. При равной прочности элементов соотношение между величиной ΔV_1 , пропорциональной деформированию связей, и приращением силы может быть записано в форме:

$$\Delta P_3 = E_k \Delta V \quad (4)$$

где E_k – модуль пропорциональности.

В связи с тем, что прочность элементов различна и разрушаются они неодновременно, по случайному закону, величина E_k есть случайная функция, подчиняющаяся нормальному закону распределения плотности вероятности R_x того или иного значения. E_k подчиняется кривой Гаусса, уравнение которой представлено в следующем виде:

$$R_{(x)} = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x_i - x_{cp})^2}{2\sigma^2}},$$

где x_i и x_{cp} – текущее и среднее значение функций; σ – среднеквадратичное отклонение.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i)^2 - nx_{cp}^2}{n}}$$

n - число значений одного переменного x_i .

В дифференциальной форме соотношение (4) записывается в виде:

$$\frac{dP_3}{dV_3} = E(V) \quad (5)$$

Сжимаемый в замкнутом объеме газ (элемент 4) характеризуется уравнением состояния политропического газа:

$$p' = AV^{-\beta}; \quad p' = p_3 - p_0;$$

записываемого для рассматриваемого случая:

$$\frac{dV_3}{dP_n} = A\beta^{-1}V^{-1-\beta} \quad (6)$$

где A - газовая постоянная; β - показатель политропы; P_0 - атмосферное давление.

Соотношения между элементами определяются в соответствии со следующими дифференциальными уравнениями:

$$dV = dV_1 + dV_2 + dV_3 \quad (7)$$

$$\text{где } V = V_{ck} + V_n; \quad V_n = V_2 + V_3; \quad V_{ck} = \alpha_1 \cdot V_o;$$

$$V_2 = \alpha_2 \cdot V_o; \quad V_3 = \alpha_3 \cdot V_o;$$

$$dP = \frac{dP_2}{dV_n} dV_n + \frac{dP_3}{dV_n} dV_n + \frac{dP_4}{dV_n} dV_n;$$

$$dV = \frac{dV_3}{dP_4} dP_4 + \frac{dV_2}{dP_4} dP_4.$$

С учетом уравнения (7) общее уравнение, описывающего реологическую модель грунта, будет иметь вид:

$$dP - (dV - \frac{dV_1}{dP} dP) \cdot (\frac{dP_4}{dV_n} + \frac{dP_2}{dV_n} + \frac{dP_3}{dV_n}) = 0 \quad (8)$$

Подставляя значения соответствующих производных из выражений (1-6), получаем:

$$dP - (dV - \frac{dP}{K}) \cdot (A\beta^{-1}V^{-1-\beta} + \alpha_1\varphi\Delta V + E_k(V)) = 0 \quad (9)$$

Уравнение (9) позволяет получить усилие P в функции от деформации. Отличительная особенность этого уравнения заключается в том, что оно позволяет связать усилие, действующее на лобовую поверхность рабочего органа, с физическими показателями грунта. Фигурирующие в уравнении коэффициенты K_1, α_1, φ и другие определяются через смещение грунта, угол внутреннего трения и модуль пропорциональности при одноосном сжатии. Величина P_0 определяется как напряжение от веса столба (H – глубины погружения).

Нижеприведенные формулы позволяют определить показатели в уравнении, как коэффициенты, через ряд других показателей грунта, определяемых в полевых условиях

$$\rho = \alpha_1\rho_1 + \alpha_2\rho_2 + \alpha_3\rho_3,$$

где ρ – плотность грунта в целом; $\rho_1; \rho_2; \rho_3$ – плотность отдельных его фаз.

$$\rho_1 \approx 2,5 - 2,8 \text{ г/см}^3,$$

$$\rho_2 \approx 1 - 1,45 \text{ г/см}^3,$$

$$\rho_3 \approx 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ г/см}^3.$$

$$\gamma_{ск} = \alpha_1\rho_1 - \text{объемный вес скелета; } W_{\theta} = \frac{\alpha_2\rho_2}{\alpha_1\rho_1} - \text{весовая влажность;}$$

$$W_v = \alpha_2\rho_2 - \text{объемная влажность; } n_{\text{об}} = \alpha_2 + \alpha_3 - \text{общая пористость;}$$

$$n_{св} = \alpha_3 - \text{свободная пористость; } \varepsilon_n = \frac{\alpha_2 + \alpha_3}{\alpha_1} - \text{коэффициент пористости.}$$

Трудность решения уравнения (9) на АВМ заключается в моделировании случайной функции $E_k(V)$, которая подчиняется нормальному закону распределения.

Электронная модель генератора случайных величин, подчиняющихся нормальному закону распределения, приведена на рис.2. Впервые эта модель описана в работе Andersen Thomas [2].

Генератор псевдослучайных чисел представляет собой сочетание двух генераторов треугольных импульсов и запоминающего устройства. 1 - генератор собран на усилителях 1-3, а П - на усилителях 5-7. На входе интегратора 2 имеется контакт, при размыкании которого напряжение на выходе 1-генератора остается неизменным.

Усилители 5,6,7 образуют схему формирования импульсов, управляющих работой реле P_1 и через него первым генератором. Дискретные значения напряжения с выхода 3-го усилителя передаются на запоминающее устройство (усилитель 4), которое работает по схеме инерционного звена во время приема информации для запоминания. Реле P_1 управляет переходом из режима инерционного звена в режим запоминающего устройства так, чтобы цепь интегратора 4 замыкалась в момент размыкания цепи интегратора 2.

Этим обеспечивается такая работа схемы, что сигнал X_k сохраняет значение X в интервале времени между размыканием контакта $1P_1$. Если отношения периодов колебания первого генератора и генератора управляющих импульсов есть число иррациональное, то напряжение X_k будет принимать случайные значения, равномерно распределенные в линейном диапазоне - 100в X_k 100в. Соединение усилителей 4 и 6 усиливает случайность появления X_k , обеспечивая изменение интервала срабатывания реле P_1 .

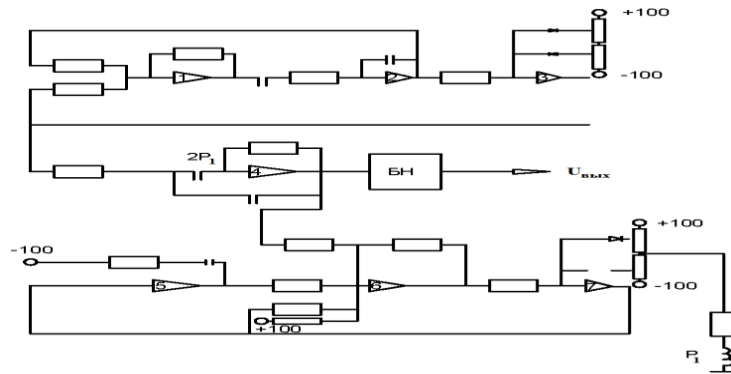


Рис.2. Электронная модель генератора псевдослучайных чисел
Fig.2. Electronic Model of Pseudorandom Number Generator

Усилие, действующее со стороны грунта на рабочий орган, можно разложить на нормальные и касательные составляющие отдельно для каждой зоны:

$$N_1 = P_1 \cos \rho_1; \quad N_2 = P_2 \cos f;$$

$$T_1 = P_1 \sin \rho_1; \quad T_2 = P_2 \sin f.$$

Сила трения, действующая со стороны грунта на боковые поверхности ножа ($T_{бок}$), зависит от многих факторов: от конструкции ножа и его материала, физико-механических свойств грунта, качества обработки боковой поверхности ножа, относительной скорости скольжения трущихся поверхностей, давления на трущиеся поверхности, а также от коэффициента трения, который, в свою очередь, является функцией многих переменных.

Обсуждение результатов. При составлении математического описания процесса выделяют три составляющих силы трения (4):

- составляющую, пропорциональную давлению на трущиеся поверхности $Pf_{тр}$;
- составляющую, пропорциональную скорости X движения рабочего органа C_1X ;
- составляющую, которая является функцией параметров, трудно поддающихся математическому описанию.

Поэтому в первом приближении эта составляющая принимается постоянной C_0 .

$$\text{Таким образом, } 2T_{бок} = f_{тр} P_o + c_1 x + c_o$$

Для составления дифференциального уравнения движения рабочего органа воспользуемся принципом Даламбера. Уравнение, описывающее продвижение ножа, имеет вид:

$$P_T - 2T_{бок} - P_1 \cos(90^\circ - \alpha_1 - \rho) - P_2 \cos(90^\circ - \alpha_2 - f) = \frac{G_2}{g} \ddot{x} \quad (10)$$

Структурная схема решения задачи на АВМ, составленная в соответствии с уравнением (10), будет иметь вид, представленный на рис.3.

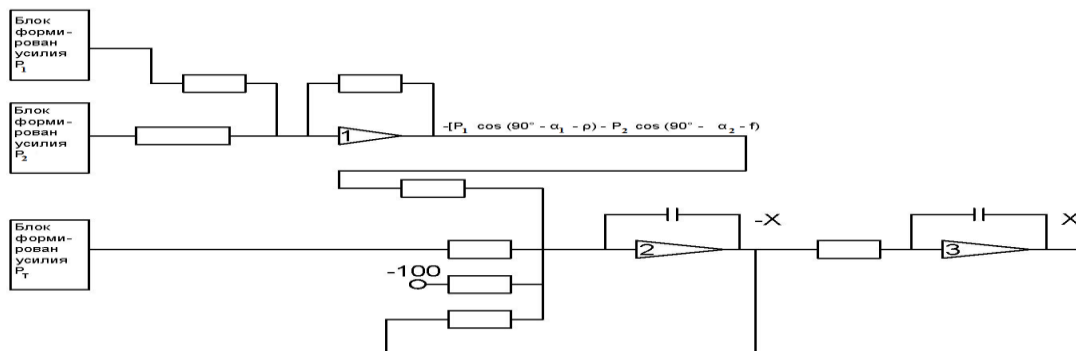


Рис.3. Структурная схема решения задачи на АВМ
Fig.3. Structural scheme for solving the problem on the AVM

При составлении математического описания процесса в первом приближении принято, что вертикальные колебания ножа малы и ими можно пренебречь.

Вывод. Исследования процесса резания минеральных грунтов узкими глубокими ножами на электронной модели позволят на стадии проектирования оценить влияние изменения различных факторов и параметров на режимы работы дренажной машины.

Библиографический список:

1. Маслов Б.С. Пути совершенствования осушительных систем. Труды ВНИИГиМ им.А.Н. Костякова. Том.52, Москва, 1972. – С.5-21.
2. Томин Е.Д. Механизация строительства закрытого дренажа. Москва, Издательство «Колос», «Хлопководство», 1978. - С.36-40.
3. Гасанов Т.Г. Устройство термического кротового дренажа. Москва, Издательство «Колос», «Хлопководство», 1978. - С.40-41.
4. Гасанов Т.Г. Прокладка кротового дренажа с термически закрепленными стенками. Москва, Издательство «Колос», «Мех. и электр. соц. сельс. хозяйства», 1978. - С.24-26.
5. Бейлин Д.Х. Механизация дренажных работ. Перспективы механизации строительства дренажа. Москва, Издательство «Колос», 1975, 256 с.
6. Томин Е.Д., Казаков В.С. Опыт строительства, эксплуатации и ремонта закрытого дренажа на осушаемых землях. Москва, Издательство «Колос», 1970, 114 с.
7. Томин Е.Д., Маммаев З.М., Гумбург Г.В. Опыт строительства закрытого дренажа на осушаемых и орошаемых землях. М., Издательство «Машиностроение», «Строительные и дорожные машины», 1975. - С.22-24.
8. Tomin E.D, Mammaev Z.M, Gumburg G.V «On experience in construction of mole drainage systems in areas to be dewatered and irrigated» M., Publishing house "Mechanical engineering", "Construction and road machines", 1975. - P.22-24.
9. Гасанов Т.Г., Магомедов Г.М. К вопросу борьбы с пучинообразованием на автомобильных дорогах. Махачкала: ДГИНХ, 2013. – 154 с.
10. Агаханов Э.К., Агаханов Г.Э. Математическое моделирование воздействия порового давления на скелет грунта. Строительство: проблемы и перспективы: сборник статей по материалам международной научно-практической конференции, 29-30 марта 2013 г. Махачкала: ДГИНХ, 2013. – 154 с.
11. Варданян Г.С., Андреев В.И., Атаров Н.М., Горшков А.А. Сопротивление материалов с основами теории упругости и пластичности. М. Издательство АСВ, 1995.- 568 с.
12. Черный Г.И., Смирнов А.Г. Основы динамики грунтов и ее практическое приложение. «Наукова думка», 1968.
13. Агаханов Э.К., Магомедминов Н.С. Раджабов Р.Г. Моделирование напряжений в композитном изделии стандартным оптически чувствительным материалом. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2017; 44(4):8-18.
14. Варданян Г.С. Прикладная механика: применение методов теории подобия и анализа размерностей к моделированию задач механики деформируемого твердого тела, Учебное пособие, - М.: НИЦ ИНФРА-М, 2016. - 174 с.
15. Клименко Н.И. Решение задач о напряженном состоянии вращающихся неоднородных в окружном направлении анизотропных полых цилиндров. Прикл. мех., Киев, 1999, 35, №12, с. 56-62.
16. Прейсс А.К., Граненко Ф.А. Применение метода «замораживания» к определению напряжений на вращающихся моделях, Поляризационно-оптический метод исследования напряжений, Под ред. Н. И. Пригоровского, М., 1956, с. 271-279.
17. Рябенков Н.Г. О выполнении условий свободной границы торца связующего в теории слоистых конструкций//Матер. 4-го Междунар. Симпозиума, Дин.и техно. Проблемы механики конструк. и сплошных сред. Ярополец, 16-18 февр., 1998, М., 1998, с. 21-22.
18. Фриштер Л.Ю., Савостьянов В.Н. О представлении кусочно-однородной задачи теории упругости в виде суммы однородных задач, Вопросы математики, механики сплошных сред и применения математических методов в строительстве, Сб. научн. тр. МГСУ, Москва, 1999, с. 169-178.
19. Хесин Г.Л., Варданян Г.С., Мовила Н.И. Моделирование напряженного состояния конструкций из разномодульных материалов на вязкоупругих моделях, Тр. ин-та, МИСИ, 1975, Вып. 125-126, с. 81-89.
20. Шкелев Л.Т., Одинец Е.А. Приближенный метод решения пространственной задачи теории упругости, Киевск. нац. Ун-т стр-ва и архит., Киев, 1999, 8с., Деп. в ГНТБ Украины 26.07.99, №212-Ук. 99.
21. Andersen Thomas. Control system automatic. 1962, №4.
22. AshidaFumihiro, Tauchert Theodore. Control of a distribution of transient thermoelastical displacement in a composite circular disk, R.ISTAM, 2000, 20th, Intern. cong. of theor. and applied mechanics, Chicago, 27 Aug.2Sept., 2000, Abstr. Book. Urbana-Champaign (III), IUTAM, 2000, с. 166.
23. Bossavit A. On the computation of strains and stresses in symmetrical articulated structures, Exploit. Symmetry Appl. and Numer. Anal, AMS-SIAM Summer Semin, Appl. Math., Fort Collins. Colo, July 26-Aug. 1, 1992, Providence, 1993, с. 111-123.

24. Jain Rajeev, Ramachandra K., Simha K.R.Y. Rotating anisotropic disc of uniform strength, *Int. J. Mech., Sci.*, 1999, 41, №6, с. 639-648.

References:

1. Maslov B.S. Puti sovershenstvovaniya osushitel'nykh sistem. *Trudy VNIIGiM im.A.N. Kostya-kova. Tom.52, Moskva, 1972. – S.5-21. [Maslov B.S. Ways to improve drainage systems. Proceedings of the VNIIGiM im.A.N. Kostya-kova. Vol.52, Moscow, 1972. - P.5-21. (In Russ)]*
2. Tomin Ye.D. Mekhanizatsiya stroitel'stva zakrytogo drenazha. Moskva, Izdatel'stvo «Kolos», «Khlopkovodstvo», 1978. - S.36-40. [Tomin E.D. Mechanization of the construction of closed drainage. Moscow, Kolos Publishing House, "Cotton Plant", 1978. - P.36-40. (In Russ)]
3. Gasanov T.G. Ustroystvo termicheskogo krotovogo drenazha. Moskva, Izdatel'stvo «Kolos», «Khlopkovodstvo», 1978. - S.40-41. [Gasanov T.G. Thermal mole drain device. Moscow, Kolos Publishing House, "Cotton Plant", 1978. - P.40-41. (In Russ)]
4. Gasanov T.G. Prokladka krotovogo drenazha s termicheski zakreplennymi stenkami. Moskva, Izdatel'stvo «Kolos», «Mekh. i elektr.sots. sel's. khozyaystva», 1978. - S.24-26. [Gasanov T.G. Lining of mole drainage with thermally fixed walls. Moscow, Kolos Publishing House, "Fur. and elektr.sots. sels economy, 1978. - P.24-26. (In Russ)]
5. Beylin D.KH. Mekhanizatsiya drenazhnykh rabot. Perspektivy mekhanizatsii stroitel'stva drenazha. Moskva, Izdatel'stvo «Kolos», 1975, 256 s. [Beilin D.H. Mechanization of drainage works. Prospects for the mechanization of the construction of drainage. Moscow, Kolos Publishing House, 1975, 256 p. (In Russ)]
6. Tomin Ye.D., Kazakov V.S. Opyt stroitel'stva, ekspluatatsii i remonta zakrytogo drenazha na osushayemykh zemlyakh. Moskva, Izdatel'stvo «Kolos», 1970, 114 s. [Tomin E.D., Kazakov V.S. Experience in the construction, operation and maintenance of closed drainage on drained lands. Moscow, Kolos Publishing House, 1970, 114 p. (In Russ)]
7. Tomin Ye.D., Mammaev Z.M., Gumburg G.V. Opyt stroitel'stva zakrytogo drenazha na osushchayemykh i oroshayemykh zemlyakh. M., Izdatel'stvo «Mashinostroyeniye», «Stroitel'nyye i dorozhnyye mashiny», 1975. - S.22-24. [Tomin E.D., Mammaev Z.M., Humburg G.V. Experience in the construction of closed drainage on drained and irrigated land. M., "Mashinostroyeniye", "Construction and Road Machines" Publishing House, 1975. - P.22-24. (In Russ)]
8. Tomin E.D, Mammaev Z.M, Gumburg G.V «On experience in construction of mole drainage systems in areas to be dewatered and irrigated» M., Publishing house "Mechanical engineering", "Construction and road machines", 1975. - P.22-24. [Tomin E.D, Mammaev Z.M, Gumburg G.V "Mechanical engineering", "Construction and road machines", 1975. - P. 22-24. (In Russ)]
9. Gasanov T.G., Magomedov G.M. K voprosu bor'by s puchinoobrazovaniyem na avtomobil'nykh dorogakh. Makhachkala: DGINKH, 2013. – 154 s. [Gasanov T.G., Magomedov G.M. On the issue of combating heap formation on highways. Makhachkala: DGINKH, 2013. - 154 p. (In Russ)]
10. Agakhanov E.K., Agakhanov G.E. Matematicheskoye modelirovaniye vozdeystviya porovogo davleniya na skelet grunta. Stroitel'stvo: problemy i perspektivy: sbornik statey po materialam mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, 29-30 marta 2013 g. Makhachkala: DGINKH, 2013. – 154 s. [Agakhanov, E.K., Agakhanov, G.E. Mathematical modeling of the pore pressure effect on the soil skeleton. Construction: problems and prospects: a collection of articles on the materials of the international scientific-practical conference, March 29-30, 2013. Makhachkala: DGINKH, 2013. - 154 p(In Russ)].
11. Vardanyan G.S., Andreyev V.I., Atarov N.M., Gorshkov A.A. Soprotivleniye materialov s osnovami teorii uprugosti i plastichnosti. M. Izdatel'stvo ASV, 1995.- 568 s. [Vardanyan G.S., Andreev V.I., Atarov N.M., Gorshkov A.A. Resistance of materials with the fundamentals of the theory of elasticity and plasticity. M. Publishing House DIA, 1995.- 568 p. (In Russ)]
12. Chernyy G.I., Smirnov A.G. Osnovy dinamiki gruntov i yeye prakticheskoye prilozheniye. «Naukova dumka», 1968. [Cherny G.I., Smirnov A.G. Fundamentals of soil dynamics and its practical application. "Naukova Dumka", 1968. (In Russ)]
13. Agakhanov E.K., Magomedeminov N.S. Radzhabov R.G. Modelirovaniye napryazheniy v kompozitnom izdelii standartnym opticheski chuvstvitel'nyim materialom. Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki. 2017; 44(4):8-18. [Agakhanov E.K., Magomedeminov N.S. Radjabov R.G. Stress modeling in a composite product with a standard optically sensitive material. Bulletin of the Dagestan State Technical University. Technical science. 2017; 44 (4): 8-18. (In Russ)]
14. Vardanyan G.S. Prikladnaya mekhanika: primeneniye metodov teorii podobiya i analiza razmerno-stey k modelirovaniyu zadach mekhaniki deformiruyemogo tverdogo tela, Uchebnoye posobiye, - M.: NITS IN-FRA-M, 2016. - 174 s. [Vardanyan G.S. Applied mechanics: the application of the methods of the theory of similarity and analysis of dimensions to the modeling of the problems of the mechanics of a deformable solid body, Textbook, - Moscow: INITRA-M, 2016. - 174 p. (In Russ)]
15. Klimenko N.I. Resheniye zadach o napryazhennom sostoyanii vrashchayushchikhsya neodnorodnykh v okruzhnom napravlenii anizotropnykh polykh tsilindrov. Prikl. mekh., Kiyev, 1999, 35, №12, s. 56-62. [Klimenko N.I.

- Solving problems on the stressed state of rotating anisotropic hollow cylinders inhomogeneous in the circumferential direction. *Attach fur.*, Kiev, 1999, 35, №12, pp. 56-62. (In Russ)]
16. Preys A.K., Granenko F.A. *Primeneniye metoda «zamorazhivaniya» k opredeleniyu napryazheniy na vrashchayushchikhsya modelyakh*, *Polyarizatsionno-opticheskiy metod issledovaniya napryazheniy*, Pod red. N. I. Prigorovskogo, M., 1956, s. 271-279. [Preiss, A.K., Granenko, F.A. Application of the method of "freezing" to the determination of stresses on rotating models, Polarization-optical method for studying stresses, Ed. N. I. Prigorovskogo, M., 1956, pp. 271-279. (In Russ)]
 17. Ryabenkov N.G. *O vypolnenii usloviy svobodnoy granitsy tortsa svyazuyushchego v teorii sloistyykh konstruktssii/Mater. 4-go Mezhdunar. Simpoziuma, Din.i tekhn. Problemy mekhaniki konstruk. i sploshnykh sred.* Yaropolets, 16-18 fevr., 1998, M., 1998, s. 21-22. [Ryabenkov N.G. On the fulfillment of the conditions of the free boundary of the end face of the binder in the theory of layered structures // Mater. 4th Intern. Symposium, Din.i techno. Mechanical design problems. and continuous media. Yaropolets, Feb. 16-18, 1998, M., 1998, pp. 21-22. (In Russ)]
 18. Frishter L.YU., Savost'yanov V.N. *O predstavlenii kusochno-odnorodnoy zadachi teorii uprugo-sti v vide summy odnorodnykh zadach*, *Voprosy matematiki, mekhaniki sploshnykh sred i primeneniya matema-ticheskikh metodov v stroitel'stve*, Sb. nauchn. tr. MGSU, Moskva, 1999, s. 169-178. [Frishter L.Yu., Savostyanov V.N. On the representation of the piecewise-homogeneous problem of the theory of elasticity as a sum of homogeneous problems, Mathematical problems, continuum mechanics and the application of mathematical methods in construction, Coll. scientific tr. MGSU, Moscow, 1999, pp. 169-178. (In Russ)]
 19. Khesin G.L., Vardanyan G.S., Movila N.I. *Modelirovaniye napryazhennogo sostoyaniya konstruktssiy iz raznomodul'nykh materialov na vyazkouprugikh modelyakh*, Tr. in-ta, MISI, 1975, Vyp. 125-126, s. 81-89. [Khesin G.L., Vardanyan G.S., Movila N.I. Simulation of the stress state of structures from multi-modular materials on viscoelastic models, Tr. Inst., IISS, 1975, Vol. 125-126, pp. 81-89. (In Russ)]
Shkelev L.T., Odinet Ye.A. *Priblizhennyi metod resheniya prostranstvennoy zadachi teorii uprugosti*, Kiyevsk. nats. Un-t str-va i arkhitekt., Kiyev, 1999, 8s., Dep. v GNTB Ukrainy 26.07.99, №212-Uk. 99.
 20. [Shkelev L.T., Odinet E.A. An approximate method for solving the spatial problem of the theory of elasticity, Kiev. nat University of Construction and Architect., Kiev, 1999, 8c., Dep. at the State Scientific and Technical Library of Ukraine on July 26, 1999, No. 212-Uk. 99(In Russ)]
 21. Andersen Thomas. *Control system automatic*. 1962, №4.
 22. AshidaFumihiro, Tauchert Theodore. *Control of a distribution of transient thermoelalastic displacement in a composite circular disk*, R.ISTAM, 2000, 20th, Intern. cong. of theor. and applied mechanics, Chicago, 27 Aug.2Sept., 2000, Abstr. Book. Urbana-Champaign (III), IUTAM, 2000, p. 166.
 23. Bossavit A. *On the computation of strains and stresses in summetrical articulated structures*, Exploit. Symmetry Appl. and Numer.Anal, AMS-SIAM Summer Semin, Appl. Math., Fort Collins. Colo, July 26-Aug. 1, 1992, Providence, 1993, pp. 111-123.
 24. Jain Rajeev, Ramachandra K., Simha K.R.Y. *Rotating anisotropic disc of uniform strength*, Int. J. Mech., Sci., 1999, 41, №6, pp. 639-648.

Сведения об авторах.

Батманов Эдвард Загидинович – кандидат технических наук, декан транспортного факультета.

Гасанов Тельман Гамзатович – кандидат технических наук, доцент, кафедра организации и безопасности движения.

Гусейнов Марат Рамизович – старший преподаватель, кафедра автомобильных дорог, оснований и фундаментов.

Information about the authors:

Edvard Z. Batmanov – Cand. Sci. (Technical), Assoc. Prof., Dean of the Faculty of Transport

Telman G. Gasanov – Cand. Sci. (Technical), Assoc. Prof., Department of organization and traffic safety.

Marat R. Guseynov–Senior Lecturer, Department of highways, foundations and foundations.

Конфликт интересов.

Conflict of interest.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию 10.08.2018.

Received 10.08.2018.

Принята в печать 18.09.2018.

Accepted for publication 18.09.2018.

Для цитирования: Белова Н.А., Кортovenко Л.П., Страхова Н.А. Добавки в битумы. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2018;45 (3): 175-184. DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-3-175-184

For citation: Belova N.A., Kortovenko L.P., Strakhova N.A. Additives to bitumens. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2018; 45(3):175-184. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-3-175-184

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

УДК 665.775

DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-3-175-184

ДОБАВКИ В БИТУМЫ

Белова Н.А.³, Кортovenко Л.П.², Страхова Н.А.¹

¹Государственный морской университет им. адмирала Ф.Ф. Ушакова,

¹353918, г. Новороссийск, просп. Ленина, 93, Россия,

^{2,3}Астраханский государственный архитектурно-строительный университет,

^{2,3}414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 18, Россия,

¹e-mail: strakhova_na@mail.ru, ²e-mail: astra_kortovenko@mail.ru,

³e-mail: astra_belova@mail.ru

Резюме. Цель. Повышение качества дорожных битумов в настоящее время особо актуально, т.к. позволяет продлить срок службы дорожных асфальтобетонных покрытий при постоянно увеличивающемся автопарке машин. Основной задачей исследований являлось изучение влияния отработанных масел на процесс структурообразования окисленных битумов. **Метод.** Введение добавок различной природы, т.е. его модификация, как самого, так и сырья является одним из основных способов улучшения физико-механических свойств битумов. Введение в битум небольших добавок, содержащих карбоксильные группы, оксикислоты и смоляные кислоты позволяет целенаправленно регулировать не только адгезионные свойства битумов, но и обеспечивать стабильность асфальтобетонной смеси при высоких температурах. В качестве компонентов полифункционального модификатора, для улучшения физико – химических и физико – механических свойств битумов и их асфальтобетонов предложены: дистиллированное таловое масло ТУ 13-00281074-26-95, петаэритрит ГОСТ 9286-76 и сополимер этилена с винилацетатом ТУ 6-05-1636-97. **Результат.** Разработана технология вовлечения отработавших масел в гудроны с целью получения высококачественных дорожных марок битума БНД 60/90 и исследованы качественные характеристики битумного сырья, отработанных синтетических и минеральных масел и битумов. Отработанные масла с моюще - диспергирующей присадкой КНД (коллоидная дисперсия карбоната кальция в масле М-14 стабилизированная сульфонатом кальция, используемая при получении моторных топлив) могут быть использованы в составе остаточного сырья процессов нефтепереработки в качестве активирующей добавки. **Вывод.** Улучшение физико-механических свойств высококачественных битумов возможно комплексной модификацией различными добавками, что позволяет создавать условия для долговременной работы дорожных покрытий под действием современных транспортных нагрузок и неблагоприятных погодных условий. Для получения модифицированных битумов улучшенного качества требуется подбор модифицирующих добавок и технологии их получения.

Ключевые слова: высококачественные битумы, дорожные покрытия, современные транспортные нагрузки, модифицированные битумы

TECHNICAL SCIENCE
BUILDING AND ARCHITECTURE
ADDITIVES TO BITUMENS

Natalia A. Belova³, Lyubov P. Korotovenko², Nina A. Strakhova¹

¹ Admiral F.F. Ushakov State Maritime University,

¹93 Lenina Ave., Novorossiysk 353918, Russia,

^{2,3} Astrakhan State University of Architecture and Civil Engineering,

^{2,3} 18 Tatishchev Str., Astrakhan 414056, Russia,

¹e-mail: strakhova_na@mail.ru, ²e-mail: astra_kortovenko@mail.ru,

³e-mail: astra_belova@mail.ru

Abstract. Objectives. Improving the quality of road bitumen is currently particularly relevant, since allows you to extend the life of road asphalt coatings with the ever-increasing fleet of cars. The main task of research was to study the effect of used oils on the process of structure formation of oxidized bitumen. **Method.** The introduction of additives of different nature, i.e. its modification, both itself and raw materials, is one of the main ways to improve the physicochemical properties of bitumens. Introduction to bitumen of small additives containing carboxyl groups, hydroxy acids and resin acids allows one to control not only the adhesion properties of bitumens, but also to ensure the stability of the asphalt concrete mixture at high temperatures. As components of a polyfunctional modifier, to improve the physicochemical and physicochemical properties of bitumen and their asphalt concrete, the following distilled talovoe oil TU 13-00281074-26-95, pentaerythritol GOST 9286-76 and ethylene-vinyl acetate copolymer are proposed. -97. **Result.** A technology has been developed to draw used oils into tars in order to obtain high-quality road bitumen grades BND 60/90 and to investigate the qualitative characteristics of bitumen raw materials, used synthetic and mineral oils and bitumen. Waste oils with detergent - dispersant additive CPD (colloidal dispersion of calcium carbonate in oil M-14 stabilized with calcium sulfonate, used in the preparation of motor fuels) can be used in the composition of the residual raw materials of refining processes as an activating additive. **Conclusion.** Improvement of the physicochemical properties of high-quality bitumen is possible by complex modification with various additives, which allows creating conditions for the long-term operation of pavements under the influence of modern traffic loads and adverse weather conditions. In order to obtain modified bitumen of improved quality, selection of modifying additives and the technology for their preparation are required.

Keywords: high-quality bitumens, road surfaces, modern transport loads, modified bitumens

Введение. Повышение качества строительства, ремонта, реконструкции автомобильных дорог лежит в основе национальной программы «Модернизация и развитие автомобильных дорог России до 2025 года», предложенной Министерством транспорта РФ. Реализация транспортной стратегии России с учетом сложных климатических условий эксплуатации требует разработки новых дорожных улучшенных материалов модификацией различными добавками.

Постановка задачи. Высококачественные битумы, в силу своих природных качеств, не в состоянии создавать условия для долговременной работы дорожных покрытий под действием современных транспортных нагрузок и неблагоприятных погодных условий. Поэтому совместно с обеспечением необходимого качества и долговечности, необходимо радикальное улучшение физико-механических характеристик этих материалов путем комплексной модификации различными добавками.

Методы исследования. В России и за рубежом широкое практическое распространение получили такие полимерные добавки, как блоксополимеры бутадиена и стирола типа СБС (ДСТ-30), этиленвинилацетат, нефтеполимерные смолы, сера и др.

Введение добавок различной природы, т.е. его модификация, как самого, так и сырья является одним из основных способов улучшения физико-механических свойств битумов. Адгезионные добавки улучшают сцепление битума с гранитными и каменными материалами, придают водостойкость асфальтобетону и предотвращают возникновение трещин, выбоин и ям у дорожного покрытия.

Полимерные добавки улучшают износостойкость и антидеформационные свойства битумов и асфальтобетонов. Благодаря добавкам повышается сопротивление образованиям на поверхности дорог колеи при высоких температурах, уменьшается опасность образования трещин при низких температурах, а также усталость асфальтобетона под действием продолжительных нагрузок.

Введение добавок кубового остатка производства 4,4-диаминодифенилметана (КОД) в битум марки БНД 90/130 приводит к значительным изменениям его дисперсного состава и увеличению вязкости композиций [1]. Окисленные битумы марки БНД 60/90 модифицируются пластификатором – маловязким гудроном с применением полимер – модификатора отечественного производства ДСТ-30-01 [2].

Введение в битум второй дисперсной фазы - полимерного материала придающего свои свойства композициям позволяет получать материал с высокими сдвиговыми характеристиками при температурах выше температуре его размягчения. Полимеры, не растворяющиеся в битуме, оказывают пластифицирующее действие на асфальтобетон, находящийся в хрупком состоянии и практически не влияют на его свойства при температурах выше температуры размягчения битума, когда вяжущее находится в вязкотекучем состоянии. Объектом исследования использовался нефтяной битум БНД 90/130, полученный из смеси западно - сибирских нефтей, содержащий 53,4% масел, 28,2% смол и 18,4% асфальтенов и полимерные модификаторы: дивинилстирольный термоэластопласт (ДСТ-30) молекулярной массы 150000 и 75000 и атактический полипропилен (АПП) молекулярной массы 20000. Суммарное содержание полимера и надмолекулярных структурных образований асфальтенов не превышает 25% [3].

Модификация битумов фосфагенами – трифосфонитрилхлоридом (ТФНХ) и полифосфонитрилхлоридом (ПФНХ) позволяет расширить температурный интервал эластичности – пластического его состояния. Фосфагены добавляли к разогретому до 125 °С битуму БН-11 (содержание асфальтенов – 17,2%, мальтенов – 82,7%) порциями при интенсивном перемешивании в течение 1,5 часа. В битум дополнительно добавлялся хлорид алюминия [4]. Смесь гудрона и асфальта (75:25 масс) с условной вязкостью соответственно 49,5 и 252,5 с (при 80 °С) окисляли в реакторе периодического действия с рабочим объемом 400 мл при температуре 235 - 250°С, расходе воздуха 1-1,5 л/мин и продолжительностью окисления 110 – 180 мин. В качестве модифицирующей добавки использовали КПАВ – четвертичное аммониевое соединение с углеводородным радикалом C17-C19 в количестве 0,06-0,07 % масс. При этом существенно на (6° С) возрастает температура размягчения и почти в 1,5 раза уменьшается глубина проникания иглы в битум, повышается индекс пенетрации, что свидетельствует об улучшении структуры битума.

В присутствии ПАВ достигается более полное использование поступающего с воздухом кислорода. В целом соотношение масла и асфальтенов в присутствии КПАВ понижается, вследствие чего повышается температура размягчения и уменьшается глубина проникания иглы при 25 °С, и в отходящих газах окисления уменьшается в 1,5-2 раза содержание кислорода и примерно на 30% продолжительность окисления [5].

Остаток вакуумной перегонки модифицированного мазута, (модифицирование мазута проводилось нетрадиционным методом в аппарате с вихревым слоем с введением элементной серы при интенсивном перемешивании при 140° С до образования однородного раствора) выкипающий выше 500° С с содержанием 17% масс асфальтенов, соответствует дорожному битуму марки БНД 200/300. Битумы с более высокой теплостойкостью можно получать изменяя условия электромагнитной обработки мазута (с Астраханского ГПЗ) и глубину последующей вакуумной перегонки [6].

Гудрон с установки АВТ-3 Рязанского НПЗ был использован в качестве сырья (его физико-химические характеристики: - температура размягчения по К и Ш -39,2 С, условная вязкость – 228,3 с, глубина проникания иглы -597 при 25 С, плотность – 1020 кг/м3, растяжимость - 75 см при 25° С).

Групповой химический состав % масс: -парафино-нафтенновые, моно- и бициклические ароматические углеводороды – соответственно 18,5;16,6 и 25 петролейно и спиртобензолные смолы – соответственно 17,4 и 13,5; асфальтены -9. Комовая сера имела степень чистоты 99,96%

масс и содержала % масс: золы - 0,014, воды – 0,4, неорганических кислот - 0,0019, органических кислот – 0,02, механических примесей – следы.

Исследуемые смеси гудрона с 1-10% масс серы подвергали дозированной механической обработке по специальной технологии и для оценки возможности получения из них битумов марок БНД и окисляли в течение 3-6 часов на лабораторной установке, моделирующей непрерывный промышленный процесс при температуре 250 – 260° С и расходе воздуха 8 л/мин на 1 кг сырья. Полученный битум эластичен (растяжимость равна 150 см) и соответствует марке БНД 60/90 [7].

Модифицирование свойств нефтяных битумов возможно вовлечением серы при температуре 120 – 130° С при совместной обработке в течение 5-15 секунд с использованием аппарата с вихревым слоем. При этом часть серы растворяется в масляных компонентах битума, проявляя себя в качестве пластификатора, увеличивая, при этом массовую долю дисперсионной среды, другая – образует дополнительную дисперсную фазу, повышая теплостойкость вяжущего [8]. Введение в битум небольших добавок, содержащих карбоксильные группы, оксикислоты и смоляные кислоты позволяет целенаправленно регулировать не только адгезионные свойства битумов, но и обеспечивать стабильность асфальтобетонной смеси при высоких температурах. В качестве компонентов полифункционального модификатора, для улучшения физико – химических и физико – механических свойств битумов и их асфальтобетонов предложены: дистиллированное таловое масло ТУ 13-00281074-26-95, петаэритрит ГОСТ 9286-76 и сополимер этилена с винилацетатом ТУ 6-05-1636-97 [9].

Гудроны западно - сибирской и арланской нефтей, вакуумированные крекинг – остатки, асфальты пропановой деасфальтизации были использованы в качестве сырья для производства битумов в комплексе исследований по определению степени физико – химического и химического взаимодействия серы с различными видами битумного сырья в условиях термообработки, механоактивации и окисления. Технико – экономическая оценка показала высокую эффективность производства битумов из нефтяного сырья, модифицированного серой [10].

В качестве полимерных модификаторов битума применяется резиновая крошка, атактический полипропилен, термоэластопласты (стирол - бутадиенстирол). В качестве пластификаторов используется индустриальное масло И-20, И-40 и остаточный экстракт селективной очистки масел, состоящий более чем на 70% из ароматических углеводородов [11].

Наиболее эффективными модификаторами битума являются набухающие полимеры, такие как дивинилстирольные термоэластопласты, этиленпропиленовые каучуки, полиэтилены, бутилкаучук. При набухании полимерных добавок происходит перестройка дисперсной структуры битума, основой которой является масляная фракция битума, что приводит к улучшению эксплуатационных свойств последнего.

В качестве битума использовали фракцию кумкольской и жанажолской нефтей, полученные вакуумной перегонкой, с температурой кипения от 450 до 550° С с последующим окислением кислородом воздуха в течение 3,4 – 4,0 часов. Процесс окисления проводили при 180 – 200° С при среднем расходе воздуха 1 л/мин на 1 кг сырья. К полученной битумной массе добавляли сополимеры бутенилциклонолов и алкилметакрилатов в различных соотношениях. Полученные битум – полимерные смеси показали улучшенные эксплуатационные свойства [12].

Влияние оптимальной добавки – комплексного модификатора КМБ-2 на основные показатели битума марки БНД 90/130 увеличивает растяжимость битума на 11,5%, повышает его адгезионную прочность на 40% и улучшает пластические свойства, прочность и трещиностойкость асфальтобетона [13]. Новое битумное вяжущее, которое используется для изготовления покрытий дорог, мостов, аэродромов и других строительных объектов, обладает высокой адгезионной способностью к минеральным компонентам основного и кислого характера и состоит из масс %: битум 80-92; продукт полукоксования углей 8-20, гексаметилентетрамин 0,35-1,0.

Модифицированный битум получают смешением исходного битума с продуктом полукоксования углей (термическая фракция более 230 °С смолы полукоксования углей) при темпе-

ратуре 110° С до получения однородной смеси, в которую вводят гексаметиленetetрамин, нагревают до 160° С и выдерживают при этой температуре 30 минут не прекращая перемешивания [14].

Введение в стандартные битумы 3% парафиновых добавок с высокой температурой плавления приводит к практическому переводу их по показателю пенетрации в более консистентную марку, резко повышает их температуру размягчения. Снижает дуктильность (в случае исходных битумов марок БНД 90/130, БНД 130/200 до уровня меньшего нормативных требований, повышает индекс пенетрации за счет огромной температуры размягчения до чрезмерно высокого и неприемлемого для обычных битумов значений. Битумы с добавками остаются агрегативно - устойчивыми при хранении в условиях высоких температур [15].

Для активации битума ультразвуком и улучшения его адгезионных свойств, образцы каменного материала после погружений в обработанный ультразвуком битум выдерживался в течение 15, 30, 60, 90, 180 минут, после чего подвергался кипячению в растворе поваренной соли в течение 30 минут. После ультразвуковой обработки вязкость битума уменьшается на 10-50% и при приготовлении асфальтобетонной смеси происходит незамедлительное объединение его с минеральными составляющими [16]. Сера, входящая в состав тяжелых остатков перегонки нефти, способствует получению битумов высокого качества. Она выполняет роль структурирующего агента в битуме, а также пластифицирует его структуру. При взаимодействии серы с тяжелыми нефтяными остатками их структура становится более аморфной, приближается к стекловидной. Сера, введенная в нефтяной остаток, при высоких температурах связывается с асфальтеновой и парафиновой частью сырья. Сера является хорошим инициатором процесса окисления.

Добываемая нефть и газовые конденсаты (особенно Астраханское газоконденсатное месторождение) богаты серой и требуют очистки. Получаемая сера накапливается в отвалах, т.к. ее реализуют только около 40%, а остальное хранится, как правило, на открытых полигонах. При хранении серы протекают процессы: микробиологического окисления серы с образованием серной кислоты, сублимация и выветривание, выброс остаточных H_2S и SO_2 , окисление серы под действием внешних факторов, взаимодействие серы с углеводородами с образованием серосодержащих органических соединений. Производство, хранение и транспортировка больших объемов технической серы сопряжены с высокими текущими и капитальными затратами и представляют серьезную экологическую проблему для населения близлежащих городов [17].

В качестве модифицирующих добавок битумов могут быть использованы отработанные масла. Отработанные масла являются одними из крупнотоннажных отходов, образующимися в процессе производственной деятельности предприятий и использования в бытовой сфере. Масла в процессе работы в машинах и механизмах соприкасаются с металлами и воздухом, загрязняются водой и пылью, разжижаются топливом, подвергаются воздействию температуры, давления, электрического поля и других факторов, вследствие чего их физико-химические (вязкость, кислотное число, зольность, коксуемость, температура вспышки, содержание воды, механических примесей, цвет) и эксплуатационные свойства с течением времени изменяются. Повторное использование отработанных моторных масел по прямому назначению после очистки и даже вторичной переработки (регенерации) требует более квалифицированного подбора соответствующих пакетов присадок, однако и в этом случае, регенерированные масла подвержены более интенсивному старению по сравнению с маслами, полученными традиционным способом. Вовлечение отработанных масел или вторичное их использование в производстве битумов является одной из приоритетных задач, решение которых может принести экономическую выгоду.

Обсуждение результатов. Основной задачей исследований являлось изучение влияния отработанных масел на процесс структурообразования окисленных битумов. Для проведения исследований были отобраны образцы гудронов с установки ООО «Битум» ОАО «Салават-нефтеоргсинтез» и отработанного масла индустриального марки И-40А с установок Астраханского ГПЗ.

Сырье гудрон (СБ 20/40) для производства нефтяных дорожных битумов имел следующую характеристику: -вязкость, ВУ⁸⁰ равную 31,0 по ГОСТ 11503, температуру вспышки в открытом

тигле 212⁰С по ГОСТ 4333, массовую долю воды (%, отсутствие) по ГОСТ 2477, плотность при 20 ⁰С 1001,3 кг/м³ по ГОСТ 3900. Битумы получали на лабораторной установке периодического действия (рис.1), состоящей из: окислительной колонны, системы подачи и регулирования воздуха в реактор, системы очистки газа (состоящей из поглотительных склянок (6а,6б,6в), две из которых предназначены для поглощения сероводорода и сернистых соединений (6б,6в), третья для конденсации выделившихся при окислении водяных паров и органических веществ).

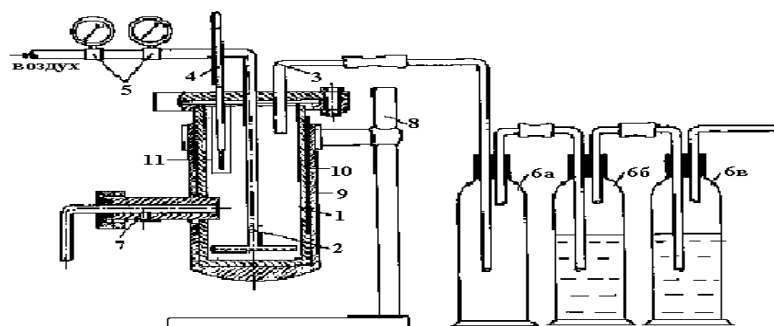


Рис.1. Лабораторная установка для получения окисленных битумов

1 - окислительная колонна; 2 - барботер; 3 - отвод отходящих газов; 4 - термометр; 5 – расходомер; 6а,б, в - склянки поглотительные; 7 - пробоотборник; 8 - штатив, 9 - теплоизоляционный слой, 10 - электрообогрев, 11 - карман для термометра

Fig.1. Laboratory installation for receiving the oxidized bitumens

1 - oxidation column; 2 - bubbler; 3 - off gas exhaust; 4 - thermometer; 5 - flow meter; 6a, b, c - absorption flasks; 7 - sampler; 8 - tripod, 9 - heat insulating layer, 10 - electrical heating, 11 - thermometer pocket

Окислительная колонна - реактор представляет собой вертикальный цилиндрический аппарат, снабженный штуцерами для подачи воздуха поступающего на окисление в низ колонны и отвода паров и газов. Температуру в колонне регулировали изменением напряжения в обмотке колонны с помощью ЛАТРа. Работу осуществляли следующим образом - реактор заполняли сырьем (210г) и постепенно нагревали до необходимой температуры. После достижения требуемой температуры процесса (250 ⁰С) в колонну через барботер подавали воздух с объемной скоростью 2,5 л/мин на кг сырья. Выходящий сверху колонны отработанный воздух и отдув проходили через поглотительные склянки, заполненные 5,0 % - ным раствором щелочи и минеральным маслом, где происходило поглощение сернистых газов, низкомолекулярных компонентов гудрона, низкокипящих продуктов окисления, продуктов крекинга и далее газ поступал в атмосферу. Процесс окисления контролировали по температуре размягчения битумов (метод Кольцо и шар). Отработанное масло марки И-40А использовали в качестве пластифицирующей добавки. В табл.1 приведены показатели качества окисленных битумов, полученных из гудрона (СБ 20/40) с вовлечением в сырье чистого и отработанного масла промышленного марки И-40А в количестве 5% от массы.

Таблица1. Окисление гудрона (СБ 20/40)с добавлением отработанного масла индустриального марки И-40А

Table 1. Oxidation of tar (SB 20/40) with the addition of waste oil of industrial brand I-40A

Температура процесса окисления, °С Temperature Process oxidation	Количество добавки (% масс.) Quantity Supplements (% by weight)	Время окисления, ч Oxidation time, h	Расход воздуха, л/ч кг сырья Air consumption, l / h kg of raw material	Температура размягчения окисленного битума, °С Softening point of oxidized bitumen
Исходное сырье Original raw material	0	0	0	24
250	0	1,1	2,5	47
250	5% чистого масла pure oil	2,2	2,5	48
250	5% грязного масла dirty oil	1,0	2,5	28,5
250	5% грязного масла dirty oil	1,2	2,5	32,5
250	5% грязного масла dirty oil	1,3	2,5	36

Для разработки технологии вовлечения отработавших масел в гудроны и получения высококачественных битумов дорожных марок исследованы качественные характеристики битумного сырья и отработанных индустриальных марок И-40А масел.

Как показали предварительные исследования, качество битумов улучшается при добавлении отработанных масел до 7 % масс. На основании проведенных исследований была разработана технология вовлечения отработавших масел в гудроны с целью получения высококачественных дорожных марок битума БНД 60/90 и исследованы качественные характеристики битумного сырья, отработанных синтетических и минеральных масел и битумов. Масла в процессе работы меняют свои эксплуатационные свойства в результате разложения и окисления. В них попадают топлива, вода. Увеличиваются кислотность, зольность, коксуемость, появляются смолы, шлам, падают вязкость, индекс вязкости, температура вспышки, масла темнеют. В масле разрушаются присадки. Установлено, что при этом 70-80% ценных углеводородов масла еще содержатся в отработанном масле и их следует использовать [18].

Способ утилизации отработанного моторного масла производят путем введения его в качестве добавки к дизельному топливу, затем производят центробежную очистку полученной смеси с разделением на фракции – тяжелую жидкую, легкую жидкую и твердую и с удалением частиц свыше 3-5 мкм и на смесь воздействуют ультразвуковым полем частотой 20-26 кГц [19]. Отработанные масла с моюще - диспергирующей присадкой КНД (коллоидная дисперсия карбоната кальция в масле М-14 стабилизированная сульфатом кальция, используемая при получении моторных топлив) могут быть использованы в составе остаточного сырья процессов нефтепереработки в качестве активирующей добавки.

Присадка и отработанные масла влияют на изменения средних размеров частиц дисперсной фазы мазута и гудрона, на материальный баланс процессов вакуумной перегонки мазута и окисления гудрона, а также на качество полученных продуктов. Оптимальные концентрации отработанных масел определены для: мазута, способствующие увеличению отбора дистиллятных вакуумных фракций и гудрона, и улучшающие качество получаемого битума (увеличивается величина пенетрации и растяжимости) [20].

Отработавшие моторные масла обрабатываются препаратом ЭКОНАФТ - М в специальном смесителе. В результате происходящих реакций препарат равномерно адсорбирует нефтепродукты с получением сухого, стойкого при хранении порошкообразного вещества – продукта утилизации нефтеотходов. Этот продукт состоит из мельчайших гранул, представляющих собой микрочастицы нефтемаслоотходов, заключенные в известковые оболочки – капсулы, которые

равномерно распределены в массе продукта и совместно с отходами полимерных материалов используются для получения полимербитумного вяжущего [21].

Отработавшее минеральное масло используется в сырьевой смеси для производства строительного кирпича. Для получения смеси гранулированный череповецкий шлам смешивают с отработавшим минеральным маслом в соотношении 1:10 и добавляют к глине в количестве 20% масс. Сформированный из полученной смеси кирпич обжигают в окисленной атмосфере при температуре 960-1000°C с выдержкой при максимальной температуре не менее 1 ч. [22]. Основным по объему направлением утилизации отработанных смазочных материалов остается их использование в качестве компонента котельного топлива или даже сжиганием в чистом виде (уничтожение). В США в качестве топлива используется 85-90% собираемых отработанных нефтяных масел [23].

Вывод. Для получения модифицированных битумов улучшенного качества требуется подбор сырья, модифицирующих добавок и технологии их введения, технология получения.

Библиографический список:

1. Басова Р.З., Леоненко В.В., Сафонов Г.А. Влияние азотистых соединений на реологическое поведение нефтяных битумов. Нефтепереработка и нефтехимия. №2. 2001. М. С.19-21
2. Моисеев В.М., Дошлов О.И., Кузора И.Е., Кукс И.В., Кращук С.Г., Лобанова Н.А. О перспективах производства полимер - битумных вяжущих в ОАО «АНХК». Нефтепереработка и нефтехимия. №8. 2003. М. С.34-35
3. Леоненко В.В., Сафонов Г.А. некоторые аспекты модификации битумов полимерными материалами. Химия и технология топлив и масел. №5. 2001. М. С.43-45
4. Поконова Ю.В., Митрофанова Л.М. Модификация битумов фосфагенами. Химия и технология топлив и масел. М. №4. 2005. С.46-48
5. Пустынников А.Ю., Рябов В.Г., Туманян Б.П., Нечаев А.Н., Питиримов В.С. Модификация сырья при получении окисленных битумов. Химия и технология топлив и масел. М. №3. 2001. С.16-17
6. Щугорев В.Д., Гераськин В.И., Страхова Н.А., Белинский Б.И., Кортюченко Л.П., Павлюковская О.Ю. Получение дорожных битумов из газоконденсатных мазутов. Химия и технология топлив и масел. М. №3. 2001. С.15
7. Гуреев А.А., Ларина Н.М., Аби-Фидель Ю., Федоров А.А. Модификация свойств дорожных битумов обработкой гудрона серой. Химия и технология топлив и масел. М. №5. 2002. С.16-17
8. Страхова Н.А., Павлюковская О.Ю., Бердников В.К. Модификация свойств битумов различными добавками. Тезисы докл. международной научной конференции "Проблемы добычи и переработки нефти и газа в перспективе международного сотрудничества ученых Каспийского региона". Астрахань. 2000. С.103-106
9. Кемалов Р.А., Петров С.М., Кемалов А.Ф. Изучение превращений компонентов модификатора для битумных материалов. Технология нефти и газа. М. №5. 2007. С.11-16
10. Теляшев И.Р., Обухова С.А., Везириев Р.Р., Хайрутдинов И.Р., Теляшев Э.Г. Производство битумов из нефтяного сырья, модифицированного элементарной серой. Нефтепереработка и нефтехимия. Материалы научно-практической конференции. 2002. Уфа. С.57
11. Кутыин Ю.А., Теляшев Э.Г., Ризванов Т.М., Биктимирова Т.Г., Викторова Г.Н., Ишкильдин А.Ф. Применение полимерных материалов различного типа для модификации тяжелых нефтяных остатков. Нефтепереработка и нефтехимия. Материалы научно-практической конференции. Сборник научных трудов. Уфа. 2001. С.38-40
12. Алиев Н.У., Калдыгзов Е.К., Молдабаева Г.Ж., Жарылгасова Ж.Ш. Влияние добавок на основе сополимеров бутенилцикланолов и некоторых акрилатов на эксплуатационные свойства битумов. Нефтепереработка и нефтехимия. Материалы научно-практической конференции. Сборник научных трудов. Уфа. 2002. С.60
13. Меренцова Г.С., Чуб Н.В. Улучшение эксплуатационных свойств оафальтобетонных покрытий автомобильных дорог. Ползуновский вестник. Барнаул. №1. 2011. С.282-285
14. Корнейчук Г.К., Стибло Г.К., Крылов А.А. Модифицированный битум и способ его получения. Владивосток. ДВГУ. Заявка на патент 2003118094/04 от 16.06.2003
15. Золотарев В.А., Пыриг Я.И., Галкин А.В. Технические свойства вязких дорожных битумов с добавками парафиновых восков. Вестник. Харьков. №75. 2009. С.10-19
16. Васильев Ю.Э., Юмашев В.М., Субботин И.В. Механохимическая активация битума. Промышленное и гражданское строительство. М. №2. 2010. С.38-39
17. Жилкин А.А. Астраханская область, добыча углеводородов. Журнал «Власть». Астрахань. №38 (791). 2008. С.21
18. Эрих В.Н., Расина М.Г., Рудин М.Г. Химия и технология нефти и газа. М. 1985. С.340-341
19. Гаранин Э.М. ЗАО «ТЕСАР-СО». Патент на изобретение 10.10.2006. RU (11)2333933 (13) C2 (51) МПК. Способ утилизации отработанного моторного масла и установка для его реализации. RU БИПМ №26 20.09.2008. С.676
20. Сафиев Р.З., Тюняев А.В., Сюняева Г.А. Материалы XXII Всероссийского меотраслевого совещания семинара по проблеме сбора, подготовки и переработки легкого углеводородного сырья, проведенного ОАО «НИПИгазпереработка». г. Краснодар. 2004. С.6
21. Патент 2283194 РОССИЯ

22. М.Э. Бутовский. Международная научно-практическая конференция «Новые технологии в переработке и утилизации отработанных масел и смазочных материалов». М. 26-28 ноября 2003. Химия и технология топлив и масел. №5.2009. С.56
23. Евдокимов А.Ю., Фукс И.Г. Утилизация отработанных смазочных материалов; технологии и проблемы. Материалы международной практической конференции и выставки. М.РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина. 26-28 ноября 2003.С.7-8

References:

1. Basova R.Z., Leonenko V.V., Safonov G.A. Vliyaniye azotistyykh soyedineniy na reologicheskoye povedeniye neftyanykh bitumov. Neftepererabotka i neftekhimiya. №2. 2001. M. S.19-21 [Basova r.z., Leonenko v.v., Safonov G.a. Influence of nitrogenous compounds on rheological behavior of oil bitumens. Refining and petrochemicals. No. 2. 2001. M. s. 19-21(In Russ)]
2. Moiseyev V.M., Doshlov O.I., Kuzora I.Ye., Kuks I.V., Krashchuk S.G., Lobanova N.A. O perspektivakh proizvodstva polimer - bitumnykh vyazhushchikh v OAO «ANKHK». Neftepererabotka i neftekhimiya. №8. 2003. M. S.34-35 [Moses v.m., Doshlov o.i., Kuzora i.e., Cooks i.v., Krashuk s.g., Lobanova N.a. about prospects for production of polymer-bitumen binders in JSC ANGARSK PETROCHEMICAL. Refining and petrochemicals. No. 8. 2003. M. pp. 34-35(In Russ)]
3. Leonenko V.V., Safonov G.A. nekotoryye aspekty modifikatsii bitumov polimernymi materialami. Khimiya i tekhnologiya topliv i masel.№5. 2001.M. S.43-45 [Leonenko v.v., Safonov G.a. some aspects of modification bitumen polymeric materials. Chemistry and technology of fuels and oils. # 5. 2001. M. pp. 43-45(In Russ)]
4. Pokonova YU.V., Mitrofanova L.M. Modifikatsiya bitumov fosfagenami. Khimiya i tekhnologiya topliv i masel. M. №4.2005.S.46-48 [Pokonova Yu.v., Mitrofanova L.m. bitumen Modification fosfagenami. Chemistry and technology of fuels and oils. M. No. 4.2005.pp. 46-48(In Russ)]
5. Pustynnikov A.YU., Ryabov V.G., Tumanyan B.P., Nechayev A.N., Pitirimov V.S. Modifikatsiya syr'ya pri poluchenii okislennykh bitumov. Khimiya i tekhnologiya topliv i masel. M. №3.2001.S.16-17 [Hermita a.Yu., V. Rjabov, tumanyan b.p., Nechayev a.n., Pitirimov V.s. raw Modification upon receipt of oxidized bitumens. Chemistry and technology of fuels and oils. M. No. 3.2001 pp. 16-17(In Russ)]
6. Shchugorev V.D., Geras'kin V.I., Strakhova N.A., Belinskiy B.I., Kortovenko L.P., Pavlyukovskaya O.YU. Polucheniye dorozhnykh bitumov iz gazokondensatnykh mazutov. Khimiya i tekhnologiya topliv i masel. M. №3. 2001. S.15 [Shchugorev E, Geraskin v.i., Strahov n.a., Belinsky b.i., Kortovenko l.p., Pavljukovskaja O.Yu. Receipt of road asphalt from the condensate fuel oil. Chemistry and technology of fuels and oils. M. No. 3. 2001 p. 15(In Russ)]
7. Gureyev A.A., Larina N.M., Abi-Fidel' YU., Fedorov A.A. Modifikatsiya svoystv dorozhnykh bitumov obrabotkoy gudrona seroy. Khimiya i tekhnologiya topliv i masel. M. №5.2002.S.16-17 [Mr. a.a., Larina n.m., Abi-Fidel, Fedorov A.a. properties Modification of road bitumen tar processing gray. Chemistry and technology of fuels and oils. M. No. 5.2002 pp. 16-17(In Russ)]
8. Strakhova N.A., Pavlyukovskaya O.YU., Berdnikov V.K. Modifikatsiya svoystv bitumov razlichnymi dobavkami. Tezisy dokladov mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii "Problemy dobychi i pererabotki nefti i gaza v perspektive mezhdunarodnogo sotrudnichestva uchenykh Kaspiyskogo regiona". Astrakhan'. 2000. S.103-106 [Insurance n.a., Pavljukovskaja o.Yu., Berdnikov V.k. Modification bitumen properties of various additives. Book of abstracts of international scientific conference "Problems of mining and processing of oil and gas in the perspective of international cooperation of scientists of the Caspian region ". Astrakhan. 2000. pp. 103-106 (In Russ)]
9. Kemalov R.A.,Petrov S.M., Kemalov A.F. Izucheniye prevrashcheniy komponentov modifikatora dlya bitumnykh materialov. Tekhnologiya nefti i gaza. M. №5. 2007. S.11-16 Publicity of r.a., s.m., Petrov Apollinary Publicity the study of transformations the components for bitumen modifier materials. Technology of oil and gas. M. No. 5. 2007.pp.11-16 (In Russ)]
10. Telyashev I.R., Obukhova S.A., Vezirov R.R., Khayrutdinov I.R., Telyashev E.G. Proizvodstvo bitumov iz neftyanogo syr'ya, modifitsirovannogo elementnoy seroy. Neftepererabotka i neftekhimiya. Materialy nauchno-prakticheskoy konferentsii. 2002. Ufa. S.57 [G. Telyashev i.r., Obukhova s.a., R. R. Vezirov, Khairutdinov i.r., Teliyashev E.g. petroleum based bitumen production, modified cell gray. Refining and petrochemicals. Materials of scientific-practical Conference. 2002. Ufa. p. 57(In Russ)]
11. Kut'in YU.A., Telyashev E.G., Rizvanov T.M., Biktimirova T.G., Viktorova G.N., Ishkil'din A.F.Primeneniye polimernykh materialov razlichnogo tipa dlya modifikatsii tyazhelykh neftyanykh ostatkov. Neftepererabotka i neftekhimiya. Materialy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Sbornik nauchnykh trudov. Ufa. 2001.S.38-40 [Kutyin Yu.a., e.g., G. Telyashev Rizvanov t.m., Biktimirova T. Viktorova, g.n., Ishkildin A.f. application of polymeric materials of various types for heavy oil residue modification. Refining and petrochemicals. Materials of scientific-practical Conference. Collection of scientific papers. UFA. 2001 pp. 38-40 (In Russ)]
12. Aliyev N.U., Kaldygozov Ye.K., Moldabayeva G.ZH., Zharylgasova ZH.SH. Vliyaniye dobavok na osnove sopolimerov butenilnitsiklanolov i nekotorykh akrilatov na ekspluatatsionnyye svoystva bitumov. Neftepererabotka i neftekhimiya. Materialy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Sbornik nauchnykh trudov. Ufa. 2002.S.60 [Aliyev N.U., Kaldygozov E.K., Moldabaev G.ZH. Zharylgasova Z.S., influence of additives on the basis of copolymers of butenilciklanolov and some acrylics on operational properties of bitumen. Refining and petrochemicals. Materials of scientific-practical Conference. Collection of scientific papers. UFA. 2002. pp. 60 (In Russ)]

13. Merentsova G.S., Chub N.V. Uluchsheniye ekspluatatsionnykh svoystv oafal'tobetonnykh pokrytiy avtomobil'nykh dorog. Polzunovskiy vestnik. Barnaul. №1.2011.S.282-285 [Merencova G.s., Chub N.v. Improving performance oafaltobetonnykh coatings for roads. Polzunovskiy Vestnik. Barnaul. No. 1.2011.pp. 282-285(In Russ)]
14. Korneychuk G.K., Stiblo G.K., Krylov A.A. Modifitsirovanny bitum i sposob yego polucheniya. Vladivostok. DVGU. Zayavka na patent 2003118094/04 ot 16.06.2003 [Korniychuk g.k., Styblo g.k., Krilov A.a. modified bitumen and how to obtain it. Vladivostok. FENU. Patent application 2003118094/04 from 16.06.2003(In Russ)]
15. Zolotarev V.A., Pyrig YA.I., Galkin A.V. Tekhnicheskiye svoystva vyazkikh dorozhnykh bitumov s dobavkami parafinovyykh voskov. Vestnik. Khar'kov. №75. 2009. S.10-19 [Zolotarev V.A., Pyrig Ya.I., Galkin A.V. Technical properties of viscous road bitumen with additives of paraffin waxes. Herald. Kharkiv. №75. 2009. pp.10-19(In Russ)]
16. Vasil'yev YU.E., Yumashev V.M., Subbotin I.V. Mekhanokhimicheskaya aktivatsiya bituma. Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo. M. №2. 2010. S.38-39 [Vasiliev Yu.E., Yumashev VM, Subbotin IV Mechanochemical activation of bitumen. Industrial and civil construction. M. №2. 2010. pp.38-39 (In Russ)]
17. Zhilkin A.A. Astrakhanskaya oblast', dobycha uglevodorodov. Zhurnal «Vlast'». Astrakhan'. №38 (791).2008. S.21 [Zhilkin A.A. Astrakhan region, hydrocarbon production. The magazine "Power". Astrakhan. № 38 (791) .2008. P.21 (In Russ)]
18. Erich V.N., Rasina M.G., Rudin M.G. Khimiya i tekhnologiya nefti i gaza. M.1985. S.340-341 [Erich VN, Rasina MG, Rudin MG Chemistry and technology of oil and gas. M.1985. pp.340-341 (In Russ)]
19. Garanin E.M. ZAO «TESAR-SO». Patent na izobreteniyе 10.10.2006. RU (11)2333933 (13) S2 (51) MPK. Sposob utilizatsii otrabotannogo motornogo masla i ustanovka dlya yego realizatsii. RU BIPM №26 20.09.2008.S.676 [Garanin E.M. CJSC TESAR-SO. Patent for invention 10.10.2006. RU (11) 2333933 (13) C2 (51) IPC. Method for utilization of used engine oil and installation for its implementation. RU BIPM №26 20.09.2008.p.676(In Russ)]
20. Safiyev R.Z., Tyunyayev A.V., Syunyayeva G.A. Materialy XXII Vserossiyskogo meeotraslevogo soveshchaniya seminar po probleme sbora, podgotovki i pererabotki legkogo uglevodorodnogo syr'ya, provedennogo OAO «NIPGazpererabotka». g. Krasnodar. 2004.S.6 [Safiev RZ, Tyunyaev AV, Syunyaeva GA Materials of the XXII All-Russian mega-industry meeting of the seminar on the collection, preparation and processing of light hydrocarbon raw materials, conducted by OJSC NIPGazpererabotka. Krasnodar city. 2004.p.6(In Russ)]
21. Patent 2283194 ROSSIYA [Patent 2283194 RUSSIA(In Russ)]
22. M.E. Butovskiy. Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Novyye tekhnologii v pererabotke i utilizatsii otrabotannykh masel i smazochnykh materialov». M. 26-28 noyabrya 2003. Khimiya i tekhnologiya topliv i masel. №5.2009. S.56 [M.E. Butovsky. International scientific-practical conference "New technologies in processing and utilization of used oils and lubricants". M. 26-28 November 2003. Chemistry and technology of fuels and oils. №5.2009. P.56(In Russ)]
23. Yevdokimov A.YU., Fuks I.G. Utilizatsiya otrabotannykh smazochnykh materialov; tekhnologii i problemy. Materialy mezhdunarodnoy prakticheskoy konferentsii i vystavki. M.RGU nefti i gaza im. I.M. Gubkina. 26-28 noyabrya 2003.S.7-8 [Evdokimov A.Yu., Fuks I.G. Utilization of used lubricants; technology and problems. Materials of the international practical conference and exhibition. M.R. of oil and gas. THEM. Gubkin. November 26-28 2003. pp.7-81. (In Russ)]

Сведения об авторах:

Страхова Нина Андреевна – доктор технических наук, профессор.

Белова Наталья Александровна – аспирантка, кафедра «Промышленное и гражданское строительство».

Кортошенко Любовь Павловна – кандидат технических наук, доцент, кафедра «Промышленное и гражданское строительство».

Information about the authors:

Nina A. Strakhova – Dr. Sci. (Technical), Prof.

Natalia A. Belova – Graduate student, Department of Industrial and Civil Engineering.

Lyubov P. Korotovenko –Cand. Sci. (Technical), Assoc. Prof., Department of Industrial and Civil Engineering.

Конфликт интересов.

Conflict of interest.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию 10.08.2018.

Received 10.08.2018.

Принята в печать 18.09.2018.

Accepted for publication 18.09.2018.

Для цитирования: Иващенко Ю.Г., Мамешов Р.Т., Мухамбеткалиев К.К. Глиносодержащие строительные композиты на основе химически активированного сырья и органических связующих. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2018; 45(3):185-193. DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-3-185-193

For citation: Ivaschenko Yu.G., Mameshov R.T., Mukhambetkaliyev K.K. Clay construction composites based on chemically activated raw materials and organic connectors. Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences. 2018; 45 (3):185-193. (In Russ.) DOI: 10.21822/2073-6185-2018-45-3-185-193

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

УДК 691.4

DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-3-185-193

ГЛИНОСОДЕРЖАЩИЕ СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОМПОЗИТЫ НА ОСНОВЕ ХИМИЧЕСКИ АКТИВИРОВАННОГО СЫРЬЯ И ОРГАНИЧЕСКИХ СВЯЗУЮЩИХ

Иващенко Ю.Г.¹, Мамешов Р.Т.², Мухамбеткалиев К.К.³

^{1,2}Саратовский государственный технический университет имени Ю.А. Гагарина,
^{1,2}410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77, Россия,

³Управление энергетики и жилищно-коммунального хозяйства Западно-Казахстанской области,

³090000, ул. Некрасова, 30/1, г. Уральск, Республика Казахстан,

¹e-mail: psk@sstu.ru, ²e-mail: mascara.t@list.ru, ³e-mail: kairat_mukh@mail.ru

Резюме. Цель. Целью данной работы является изучение теоретических аспектов и технологических возможностей химической активации и модификации органическими добавками местного глинистого сырья Поволжского региона для получения композиционных строительных материалов на базе ранее проведенных работ по разработке глиноцементных композитов. **Метод.** В связи с высокой физико-химической активностью глины и цемента в отношении органических добавок и минеральных солей, выражающаяся в высокой адсорбционной активности и чувствительности гидратационных процессов, исследования структурообразования глины изучали отдельно от цемента. Для определения изменения значения рН-показателя суспензий из глинистого и глиноцементного сырья изучали роль влияния продуктов ЭХА обработки водно-солевых растворов хлорида натрия и АЦФ смолы. **Результат.** Результаты испытаний показали, что изменяя значения рН-показателей глиноцементных образцов продуктами электрохимической активации водно-солевых растворов можно направленно воздействовать на активные центры поверхности глинистых частиц. Установлено снижение показателей адсорбции и емкости катионного обмена глинистого сырья при их модификации ацетонформальдегидной смолой. **Вывод.** Проведенные работы по исследованию структурообразования и характера влияния рН среды системы на процесс поконденсации АЦФ смолы создают предпосылки для проведения дальнейших исследований в области укрепления грунтов, их стабилизации и повышения эксплуатационных показателей.

Ключевые слова: электрохимическая активация (ЭХА), геополимер, грунтобетон, щелочная активация, щелочная среда, ацетонформальдегидная (АЦФ) смола

TECHNICAL SCIENCE
BUILDING AND ARCHITECTURE

CLAY CONSTRUCTION COMPOSITES BASED ON CHEMICALLY ACTIVATED RAW
MATERIALS AND ORGANIC CONNECTORS

Yuriy G. Ivaschenko¹, Raman T. Mameshov², Kayrat K. Mukhambetkaliev³

^{1,2} Yu.A. Gagarin Saratov State Technical University,

^{1,2} 77 Polytechnic Str., Saratov 410054, Russia,

³ Management of energy and housing and communal services of the West Kazakhstan region,

³ 30/1 Nekrasova Str., Uralsk 090000, Republic of Kazakhstan,

³ Uralsk, Kazakhstan,

¹e-mail: psk@sstu.ru, ²e-mail: mascara.t@list.ru, ³e-mail: kairat_mukh@mail.ru

Abstract. Objectives. The aim of this work is to study the theoretical aspects and technological possibilities of chemical activation and modification of organic clay raw materials of the Volga region in organic additives to obtain composite building materials based on previous work on the development of clay cement composites. **Method.** In connection with the high physicochemical activity of clay and cement with respect to organic additives and mineral salts, expressed in the high adsorption activity and sensitivity of hydration processes, studies of the structure of clay were studied separately from cement. To determine the change in pH value of suspensions from clay and clay cement raw materials, the role of the influence of ECA products of treatment of aqueous-salt solutions of sodium chloride and ACF resin was studied. **Result.** The results of the tests showed that by changing the pH values of the clay cement samples by the products of electrochemical activation of water-salt solutions, it is possible to actively influence the active centers of the surface of clay particles. The adsorption and capacity of the cation exchange of clay raw materials are reduced when they are modified with acetone formaldehyde resin. **Conclusion.** The studies carried out to study the structure formation and the nature of the effect of the pH of the system environment on the process of the condensation of the ACF resin create the prerequisites for further research in the field of soil consolidation, their stabilization and enhancement of operational parameters.

Keywords: electrochemical activation (ECHA), geopolymer, ground-concrete, alkaline activation, alkaline environment, ACF resin

Введение. Индустрия строительных материалов является динамично развивающейся отраслью и вместе с тем одной из наиболее ресурсо- и энергоемких. В связи с чем, строительной промышленности необходим переход на современные экотехнологии производства, снижение ресурсоемкости, энергетических и трудовых затрат при строительстве и эксплуатации.

Зарубежная практика строительства показывает техническую возможность и экономическую целесообразность использования материалов из местного сырья, при котором технология производства отличается простотой изготовления, меньшей энерго- и материалоемкостью, широкой сырьевой базой.

Постановка задачи. В этой связи решение проблем комплексной переработки местных сырьевых ресурсов для производства композиционных строительных материалов с повышенными прочностными, деформационными и эксплуатационными характеристиками является весьма актуальным.

Под термином «геополимеры» следует понимать многокомпонентный искусственный строительный композит, сформировавшийся при твердении в естественных условиях, смеси из осадочных горных пород (глинистое сырье), вяжущего, добавок и воды. Добавки (минеральные и органические) вводятся с целью регулирования процессов структурообразования и создания каркаса кристаллизационной структуры, внутри которой расположены агрегаты с коагуляционным и конденсационным строением [1].

Геополимеры состоят из длинных цепей: сополимеров алюминия и алюмосиликатов, катионов металлов, которые стабилизируют их, чаще всего из натрия, калия, лития или кальция, а также связанной воды.

Основоположителем геополимерных материалов, а так же само понятие «геополимер» изначально было введено Джозефом Давидовицем в конце 70-х годов прошлого века и обозначало искусственно синтезированный материал, имеющий структуру с повторяющимися в цепях атомами кремния и алюминия [2].

В интерпретации советских ученых тождественным понятием были грунтобетоны и грунтосиликаты [3], разработкой и внедрением которых активно занимался В.В. Глуховский.

Простота получения, экологичность и энергоэффективность технологии геополимеров позволяет использовать их для получения целого ряда строительных композитов с повышенными механическими свойствами и огнестойкостью, кроме того они могут служить матрицей, обеспечивающей стабилизацию токсичных отходов [4].

Дж. Давидовицем было отмечено, что реакция получения геополимеров протекает в трех стадиях: на первой стадии происходит растворение оксидов кремния и алюминия в щелочной среде – концентрированном растворе NaOH или KOH, на второй стадии происходит расщепление природных полимерных структур на мономеры, на третьей – схватывание и уплотнение в результате превращения мономеров в полимерные материалы [5].

Указанное обстоятельство позволяет выявить ряд материалов, потенциально пригодных для использования в геополимерных композициях, при этом критерием подбора является характер взаимодействия органического вещества с глинистыми минералами, обеспечивая возможность процессов модификации. С этой позиции наиболее интересным представляется применение ацетонформальдегидных смол (АЦФ) [6].

Ранее были проведены исследования [7] с использованием цементного вяжущего, глинистого сырья и продуктов ЭХА обработки водно-солевых растворов в комплексе с добавкой АЦФ для получения строительных композиционных материалов.

Глина и цемент, использованные в исследованиях проявляют высокую физико-химическую активность в отношении органических добавок и минеральных солей, выражающаяся в высокой адсорбционной активности и чувствительности гидратационных процессов, в связи с чем, исследования структурообразования глины изучали отдельно от цемента.

Методы исследования. На начальном этапе исследования определяли роль влияния продуктов ЭХА обработки водно-солевых растворов хлорида натрия (пищевая соль, ГОСТ 13830-84) с минерализацией 5 г/л, полученные на установке СТЭЛ-4Н и АЦФ смолы на изменение значения pH-показателя суспензий из глинистого и глиноцементного сырья.

Установлено, что продукты ЭХА водно-солевых растворов изменяют значения pH-показателей во всех случаях, причем наибольшие изменения наблюдаются у суспензий, затворенных католитом: в глинистых суспензиях значения pH-показателя увеличены на 30%, а в глиноцементных на 2,5%.

Для глинистых суспензий затворенных анолитом характерно снижение значений pH-показателей на 16%, а для глиноцементных – на 5,24%.

По методике (ГОСТ 21216-2014 Сырье глинистое) определена степень влияния продуктов ЭХА водно-солевых растворов на основные свойства глиноцементного сырья – изменение числа пластичности и формовочной влажности, прочностных показателей, представленных в табл. 1.

Добавка АЦФ во всех случаях изменяет пластические свойства, снижает значения pH-показателей глинистых и глиноцементных суспензий, что подтверждается данными табл.2.

Таблица 1. Свойства глиняных образцов
Table 1. Properties of clay samples

№ No.	Жидкость затворения Mixing	Число пластично- сти Number plasticity	Формовочная влажность, % Molding moisture, %	Прочность при изгибе, МПа, в возрасте, сут Flexural strength, MPa, at age, days	
				3	14
1	Неактивированная водопроводная вода Non-activated tap water	13	29	2,52	2,47
2	Анолит Anolyte	15	27	2,87	2,81
3	Католит Catholyte	16	28	3,64	3,7

В случае затворения глинистых суспензий католитом с добавкой АЦФ наблюдается прирост значения рН-показателя на 15%. Методом титрования (ГОСТ 21283-93 Глина бентонитовая для тонкой и строительной керамики. Методы определения показателя адсорбции и емкости катионного обмена), установлено снижение показателей адсорбции и емкости катионного обмена глинистого сырья при их модификации АЦФ.

Таблица 2. Пластические свойства глинистых суспензий модифицированных АЦФ
Table 2. Plastic properties of clay suspensions of modified ACF

Добавка АЦФ, % от массы Additive ACF, % by weight	Влажность на границе текучести Humidity at the boundary of fluidity				Влажность на границе раскатывания Humidity on the rolling edge				Число пластич- ности Plasticity number
	м _{влаж} С, г	м _{сух} С., г	м _{сух} , г	Влажн. W, %	м _{влаж} С., г	м _{сух} С с., г	м _{сух} , г	Влажн. W, %	
без добавки (контр.) with- out additive (counter.)	30,8	28,5	10,0	23,0	29,1	27,7	8,5	16,5	12,6
	29,0	26,5	7,7	32,5					
	29,1	26,6	7,9	31,6					
0,5	29,5	26,5	7,9	38,0	28,6	26,9	8,3	20,5	17,1
	32,1	28,5	9,7	37,1					
	30,9	27,5	9,0	37,8					
1,0	18,7	17,0	3,7	45,9	28,6	27,1	8,5	17,6	23,1
	29,0	26,2	7,4	37,8					
	27,1	24,8	6,0	38,3					

Отмечается, что АЦФ адсорбируется на поверхности глинистых частиц и участвуют в обменных реакциях. Результаты исследований по оценке физико-механических свойств глиноцементных образцов представлены в табл.3.

Таблица 3. Свойства глиноцементных образцов при соотношении Г:Ц (90:10%)
Table 3. Properties of clay cement samples at a ratio of Cl: Cm (90: 10%)

Добавка АЦФ, % Additive ACF, %	Свойства образцов в зависимости от продолжительности выдержки в воздушно-влажностных условиях Properties of samples depending on the duration of exposure in air-wet conditions					
	Через 1 час после формования 1 hour after molding		Через 1 сутки After 1 day		Через 3 суток After 3 days	
	ρ ₀ , г/см ³	Р _{сж} , МПа	ρ ₀ , г/см ³	Р _{сж} , МПа	ρ ₀ , г/см ³	Р _{сж} , МПа
- (контр.)	1,6	0,8	1,61	1,9	1,62	3,5
	1,85	1,2	1,83	2,3	1,88	4,7
	2,05	1,9	2,01	2,8	2,06	6,2
0,5	1,7	0,9	1,62	1,9	1,62	4,5
	1,72	1,35	1,88	2,60	1,62	5,72
	1,9	2,9	2,1	4,20	1,9	8,2

В зависимости от давления прессования установлено изменение коэффициента водостойкости образцов с составом Г:Ц (90:10%) контрольного образца и с добавкой АЦФ (0,5%) (рис. 1).

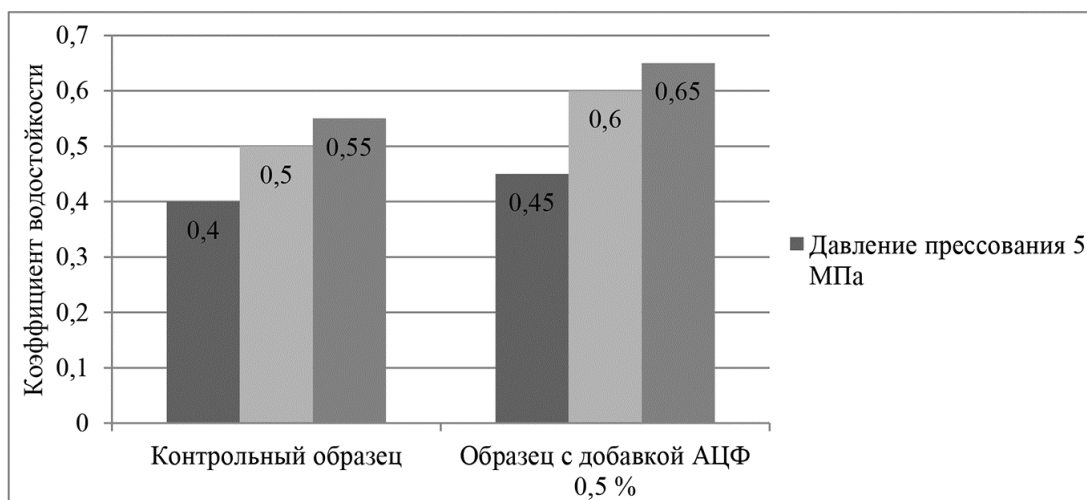


Рис. 1. Изменение показателя коэффициента водостойкости образцов

Fig. 1. Change in the coefficient of water resistance of samples

Обсуждение результатов. Установлено, что продуктами ЭХА обработки водно-солевых растворов можно направленно воздействовать на активные центры поверхности частиц. Механизмы модифицирующего воздействия продуктов ЭХА обработки водно-солевых растворов в комплексе с добавкой АЦФ на поверхность частиц глины, достигаются изменением внутренних сил дисперсной системы за счет Na^+ катионного обмена, приводящее к самодиспергированию глинистых минералов, увеличению межпакетного пространства с интеркаляцией молекул АЦФ в их структуру.

Растворы католита диспергируют глинистые частицы, выражающиеся в повышении значений рН среды.

Снижение рН-показателя дисперсной системы от действия раствора анолита и от введения 3% добавки по массе АЦФ связано с адсорбционными свойствами глинистых частиц. Адсорбция АЦФ на поверхности глинистых частиц определяется соответствием характеров функциональных групп адсорбата и адсорбента. Глинистые минералы, как адсорбент, отличаются обилием поверхностных силанольных групп, способных участвовать в донорно-акцепторных взаимодействиях с метилольными группами АЦФ по типу водородной связи.

Повышение щелочности среды за счет добавления продуктов ЭХА водно-солевых растворов, в частности католита, способствует протеканию процессов диспергирования глинистых частиц, ионного обмена, сорбции и поликонденсации молекул АЦФ смолы. Данный фактор создает предпосылки для дальнейшего изучения механизма активирующего действия щелочных растворов и процессов структурообразования строительных композитов на основе глинистого сырья и ацетонформальдегидных связующих.

Процесс поликонденсации смолы происходит при высоких показателях щелочности системы [8, 25, 26], которая может достигаться различными способами воздействия.

Среди известных методов активационного воздействия перспективным считается химический способ, предполагающий применение различных растворов солей, кислот, щелочей и т.д.

Кислотный метод активации достаточно широко распространен, однако имеет ряд недостатков, среди которых основным является большая потеря глинистого вещества (20-27%), при этом основную долю потерь составляют оксиды железа, алюминия, щелочей и щелочеземельных металлов [9-12].

Сущность щелочного способа активации заключается в использовании гидроксидов щелочных металлов (NaOH , KOH и др.) и смеси гидроксидов с солями минеральных кислот (NaCl , Na_2SO_4 , Na_3PO_4 , Na_2CO_3 и др.) [8].

Обзор литературы показывает эффективность щелочной активации при стабилизации глинистых грунтов. Значительная часть зарубежных исследований подтверждает успешное применение щелочной активации для укрепления грунтовых насыпей и покрытий [13-17].

Многообразие глинистых минералов по строению кристаллической решетки, спайность ее элементов друг с другом, а так же различное отношение к действию щелочей и образование продуктов реакции определяет эффективность процесса их активации.

При активации в щелочной среде происходит фрагментация алюмосиликатных компонентов с образованием алюминатных и низкополимерных силикатных анионов, из которых затем посредством образования связей Si-O-Al-O-Si формируется трехмерный полимерный каркас (алюмосиликатный гидрогель).

В его состав входят щелочные катионы, компенсирующие отрицательный заряд, создаваемый при встраивании тетраэдров AlO_4 между кремнекислородными тетраэдрами. Участие алюминия в образовании гетерополимерного каркаса создает дефицит положительного заряда, который компенсируется вхождением в структуру каркаса щелочных катионов [18].

Сильное набухание глин вызывается их высокой степенью сорбционной способности, что связано с подвижностью кристаллической решетки. Данный показатель может быть уменьшен путем органомодификации поверхности глинистых частиц, либо путем превращения слоев в не расширяющиеся связующие материалы, такие как гидраты кальция или алюмосиликаты с цементирующей способностью, с использованием щелочной активации,

В этой связи можно выделить ряд потенциально пригодных веществ в качестве активирующего агента, такие как $Ca(OH)_2$, NaOH или KOH.

В практике строительных материалов известен метод укрепления грунтов путем введения $Ca(OH)_2$, разработанный Н.Х. Алимухаммедовым и др. [19]. $Ca(OH)_2$ продуцирует пуццолановые реакции с повышением pH (> 12), при котором глинистые минералы или другие алюмосиликаты частично растворяются и превращаются в гидрат силиката кальция (CSH), гидрат алюмината кальция (CAN) и / или цеолитоподобные фазы [20]. Однако установлено, что при высоком содержании монтмориллонита в глинистом сырье интенсивность воздействия гидроксидом кальция снижается [7].

Механизмы активирующего воздействия щелочных растворов, в частности NaOH на поверхность частиц глины, определяются изменением внутренних сил дисперсной системы за счет Na^+ катионного обмена, приводящее к самодиспергированию глинистых минералов, то есть растворы щелочей диспергируют глинистые частицы, выражающиеся в повышении значений pH среды.

При более высоких pH пуццолановые реакции усиливаются, а реакция карбонизации избытка щелочности, которое протекает конкурируя с реакцией растворения глинистых минералов ингибируется за счет высокого содержания влаги в растворах, что значительно сокращает выброс CO_2 .

Для улучшения пуццолановых реакций и обеспечения достаточной прочности активированная структура должна оставаться влажной в течение как минимум 28 дней. При изучении конкурирующих пуццолановых и карбонатных реакций в случае известково-метакаолиновых растворов обнаружено, что карбонизация будет благоприятствовать при относительной влажности 60%, где поры раствора только частично заполнены, облегчая диффузию и растворение атмосферного CO_2 [21].

Существует ряд работ, в которых в качестве щелочного активатора использовали растворы NaOH и KOH для получения качественных альтернатив обжиговым кирпичам и плиткам [22]. Похожая технология активации была использована для укрепления грунтов и отходов строительных материалов [23,24].

Вывод. Таким образом, подтверждается технологическая возможность и целесообразность применения химической активации глинистого сырья, в процессе которого происходит интеркаляция щелочных катионов в структуру алюмосиликатного каркаса, что способствует получению материала, обладающего высокой водостойкостью и устойчивостью к выщелачиванию. В

перспективе дальнейшее исследование процесса структурообразования глинистого сырья активированного щелочными растворами и модифицированного органическими добавками.

Библиографический список:

1. Щеглов А.Ф. Грунтобетоны на основе глинистых пород КМА в дорожном строительстве. Автореф. канд.тех.наук: 05.23.05 / Щеглов Александр Федорович. – Белгород, 2003. – 22 с.
2. Чекмарев А. С., Сео Д. К., Скорина Т. В., Чекмарева Г. Д. Получение геополимерных материалов с применением природных компонентов // Вестник Казанского технологического университета. – Казань, 2012. – №20. – Стр. 50-55. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/poluchenie-geopolimernyh-materialov-s-primeneniem-prirodnih-komponentov>.
3. Глуховский В.Д., Пахомов В.А. Шлакощелочные цементы и бетоны. – Киев: Будивельник, 1978. – 184 с.
4. Kumar S., Kumar R. Mechanical activation of fly ash: Effect on reaction, structure and properties of resulting geopolymer, *Ceramics International*, Vol. 37, 2011, pp 533-541.
5. Davidovits, J. Soft Mineralurgy and Geopolymers. In proceeding of Geopolymer 88 International Conference, the Université de Technologie, Compiègne, France. 1988. – pp. 49-56.
6. Клубова, Т. Т. Роль глинистых минералов в преобразовании органического вещества и формировании порового пространства коллекторов. – М.: Наука, 1965. – 105 с.
7. Мухамбеткалиев, К.К., Иващенко, Ю.Г. Способ нейтрализации экстрактивных веществ древесины в безобжиговых составах глино-цементных композитов / К.К. Мухамбеткалиев // Вестник СГТУ. – 2010. – № 3 (48). – С 143-147.
8. Мухамбеткалиев К. К. Структура и свойства модифицированных безобжиговых глиносодержащих материалов и композитов на их основе. Автореф. канд.тех.наук: 05.23.05 / Мухамбеткалиев Кайрат Куанышкалиевич. – Волгоград, 2011. – 23 с.
9. Комаров В.С., Ратько А.И. Адсорбенты: получение, структура, свойства. – Минск: Беларус. Навука, 2009. – 256 с.,
10. Овчаренко Ф.Д. Гидрофильность глин и глинистых минералов. – Киев: Изд-во АН УССР, 1961. – 290 с.,
11. Комаров В.С. Адсорбционно-структурные, физико-химические и каталитические свойства глин Беларуси. Минск: Наука и техника, 1970. – 360 с.
12. Тарасевич Ю.И., Овчаренко Ф.Д. Адсорбция на глинистых минералах. – Киев: Наукова думка, 1975. – 350 с.
13. Cristelo N, Glendinning S, Fernandes L, Pinto AT (2013) Effects of alkaline-activated fly ash and Portland cement on soft soil stabilisation. *Acta Geotech* 8(4):395–405. doi:10.1007/s11440-012-0200-9
14. Cristelo N, Glendinning S, Pinto AT (2011) Deep soft soil improvement by alkaline activation. *Proc ICE-Ground Improv* 164(2):73–82. doi:10.1680/grim.900032
15. Cristelo N, Miranda T, Oliveira DV, Rosa I, Soares E, Coelho P, Fernandes L (2015) Assessing the production of jet mix columns using alkali activated waste based on mechanical and financial performance and CO₂ (eq) emissions. *J Clean Prod*. doi:10.1016/j.jclepro.2015.04.102
16. Zhang M, Guo H, El-Korchi T, Zhang G, Tao M (2013) Experimental feasibility study of geopolymer as the next-generation soil stabilizer. *Constr Build Mater* 47:1468–1478. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.12.007
17. Zhang M, Zhao M, Zhang G, Nowak P, Coen A, Tao M (2015) Calcium-free geopolymer as a stabilizer for sulfate-rich soils. *Appl Clay Sci* 108:199–207. doi:10.1007/s12205-013-1638-5
18. Корнеев В.И., Брыков А.С. Перспективы развития общестроительных вяжущих веществ. Геополимеры и их отличительные особенности / В.И. Корнеев // Журнал «Цемент и его применение». – 2010. – №2. – С. 51-55.
19. Зульфугаров З.Г. Исследование физико – химических свойств и отбеливающей способности глин месторождений Азербейджанской ССР и гумбина. – Баку: Изд-во АН Азерб.ССР, 1957. – 263 с.
20. D.M. Roy, Alkali-activated cements. Opportunities and challenges, *Cement and Concrete Research*. – №29 (1999) P. 249–254.
21. Ö. Cizer, K. Van Balen, D. Van Gemert, Competition between hydration and carbonation in hydraulic lime and lime-pozzolana mortars, *Advanced Materials Research*. – т Vol/ 133–134 (2010) P. 241–246.
22. Breck, D.W. Zeolite Molecular Sieves. // J. Wiley. – New York, 1974. – 771 p.
23. Elert, K., Sebastián, E., Valverde, I., Rodríguez-Navarro, C., 2008. Alkaline treatment of clay minerals from the Alhambra formation: implications for the conservation of earthen architecture. *Applied Clay Science* 39, P. 122–132.
24. E. Doehne, C.A. Price, *Stone Conservation – An Overview of Current Research*, The Getty Conservation Institute. – Los Angeles, 2010. – 174 pp.
25. Мамешов Р.Т., Иващенко Ю.Г. Грунтобетон на основе смешанных вяжущих / Мамешов Р.Т.// Журнал «Промышленность Казахстана». 2017. № 1(100). С. 82-99.
26. Мамешов Р.Т., Иващенко Ю.Г. Исследование возможности получения геополимерных композитов на основе химически активированного глинистого сырья и органической добавки // Сборник научных трудов «Ресурсо-энергоэффективные технологии в строительном комплексе региона». – Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А. Том 2. С. 105-110.

References:

1. Shcheglov A.F. Gruntobetony na osnove glinistykh porod KMA v dorozhnom stroitel'stve. Avtoref. kand.tekh.nauk: 05.23.05 / Shcheglov Aleksandr Fedorovich. – Belgorod, 2003. – 22 s. [Scheglov A.F. Concrete based on clay rocks KMA in road construction. Author. Ph.D.: 05.23.05 / Shcheglov Alexander Fedorovich. - Belgorod, 2003. - 22 p. (In Russ.)]
2. Chekmarev A. S., Seo D. K., Skorina T. V., Chekmareva G. D. Polucheniye geopolimernykh materialov s primeneniym prirodnikh komponentov // Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta. – Kazan', 2012. – №20. – Str. 50-55. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/poluchenie-geopolimernykh-materialov-s-primeneniem-prirodnikh-komponentov>. [Chekmarev A.S., Seo D.K., Skorina T.V., Chekmareva G.D. Getting Geopolymer Materials Using Natural Components // Vestnik of Kazan Technological University. - Kazan, 2012. - №20. - pp. 50-55. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/poluchenie-geopolimernykh-materialov-s-primeneniem-prirodnikh-komponentov>. (In Russ.)]
3. Glukhovskiy V.D., Pakhomov V.A. Shlakoshchelochnyye tsementy i betony. – Kiyev: Budivel'nik, 1978. – 184 s. [Glukhovskiy V.D., Pakhomov V.A. Slag alkaline cements and concretes. - Kiev: Budivelnik, 1978. - 184 p. (In Russ.)]
4. Kumar S., Kumar R. Mechanism of re-sulting geopolymer, Ceramics International, Vol. 37, 2011, pp. 533-541.
5. Davidovits, J. Soft Mineralurgy and Geopolymers. In proceeding of Geopolymer 88 International Conference, the Université de Technologie, Compiègne, France. 1988. - pp. 49-56.
6. Klubova, T. T. Rol' glinistykh mineralov v preobrazovanii organicheskogo veshchestva i formirovaniya porovogo prostranstva kollektorov. – M.: Nauka, 1965. – 105 s. [Klubova, T. T. The role of clay minerals in the transformation of organic matter and the formation of the pore space of reservoirs. - M.: Science, 1965. - 105 p. (In Russ.)]
7. Mukhambetkaliyev, K.K., Ivashchenko, YU.G. Cposob neytralizatsii ekstraktivnykh veshchestv drevesiny v bezobzhigovykh sostavakh glino-tsementnykh kompozitov / K.K. Mukhambetkaliyev // Vestnik SGTU. – 2010. – № 3 (48). – S 143-147. [Mukhambetkaliyev, K.K., Ivashchenko, Yu.G. The method of neutralization of extractive substances of wood in unburned compositions of clay-cement composites / K.K. Mukhambetkaliyev // Bulletin of SSTU. - 2010. - № 3 (48). - C 143-147. (In Russ.)]
8. Mukhambetkaliyev K. K. Struktura i svoystva modifitsirovannykh bezobzhigovykh glinosoderzhashchikh materialov i kompozitov na ikh osnove. Avtoref. kand.tekh.nauk: 05.23.05 / Mukhambetkaliyev Kayrat Kuanyshkaliyevich. – Volgograd, 2011. – 23 s. [Mukhambetkaliyev K.K. Structure and properties of modified unburned clay-containing materials and composites based on them. Author. Ph.D.: 05.23.05 / Mukhambetkaliyev Kairat Kuanyshkaliyevich. - Volgograd, 2011. - 23 p. (In Russ.)]
9. Komarov V.S., Rat'ko A.I. Adsorbenty: polucheniye, struktura, svoystva. – Minsk: Belarus. Navu-ka, 2009. – 256 s. [Komarov V.S., Ratko A.I. Adsorbents: production, structure, properties. - Minsk: Belarus. Navu-ka, 2009. - 256 p., (In Russ.)]
10. Ovcharenko F.D. Gidrofil'nost' glin i glinistykh mineralov. – Kiyev: Izd-vo AN USSR, 1961. – 290 s., [Ovcharenko F.D. Hydrophilic clay and clay minerals. - Kiev: Publishing house of the Academy of Sciences of the Ukrainian SSR, 1961. 290 p., (In Russ.)]
11. Komarov V.S. Adsorbtsionno-strukturnyye, fiziko-khimicheskiye i kataliticheskiye svoystva glin Belarusi. Minsk: Nauka i tekhnika, 1970. – 360 s. [Komarov V.S. Adsorption-structural, physico-chemical and catalytic properties of clays of Belarus. Minsk: Science and Technology, 1970. 360 p. (In Russ.)]
12. Tarasevich YU.I., Ovcharenko F.D. Adsorbtsiya na glinistykh mineralakh. – Kiyev: Naukova dumka, 1975. – 350 s. [Tarasevich Yu.I., Ovcharenko F.D. Adsorption on clay minerals. - Kiev: Naukova Dumka, 1975. 350 p. (In Russ.)]
13. Cristelo N, Glendinning S, Fernandes L, Pinto AT (2013). Acta Geotech 8 (4): 395–405. doi: 10.1007 / s11440-012-0200-9
14. Cristelo N, Glendinning S, Pinto AT (2011) Deep soft soil improvement by alkaline activation. Proc ICE-Ground Improv 164 (2): 73–82. doi: 10.1680 / grim.900032
15. Cristelo N, Miranda T, Oliveira DV, Rosa I, Soares E, Coelho P, Fernandes L (2015), emissions and CO2 emissions (eq) . J Clean Prod. doi: 10.1016 / j.jclepro.2015.04.102
16. Zhang M, Guo H, El-Korchi T, Zhang G, Tao M (2013) Experimental feasibility study of the geopolymer as the next-generation soil stabilizer. Constr Build Mater 47: 1468–1478. doi: 10.1016 / j. conbuildmat.2011.12.007
17. Zhang M, Zhao M, Zhang G, Nowak P, Coen A, Tao M (2015) Calcium-free geopolymer as a stabilizer for sulfate-rich soils. Appl Clay Sci 108: 199–207. doi: 10.1007 / s12205-013-1638-5
18. Korneyev V.I., Brykov A.S. Perspektivy razvitiya obshchestvoitel'nykh vyazhushchikh veshchestv. Geopolimery i ikh otlichitel'nyye osobennosti / V.I. Korneyev // Zhurnal «Tsement i yego primeneniye». – 2010. – №2. – S. 51-55. [Korneyev V.I., Brykov A.S. Prospects for the development of building binders. Geopolymers and their distinctive features / V.I. Korneyev // Journal "Cement and its application." - 2010. - №2. pp. 51-55. (In Russ.)]
19. Zul'fugarov Z.G. Issledovaniye fiziko – khimicheskikh svoystv i otbelivayushchey sposobnosti glin mestorozhdeniy Azerbeydzhanskoy SSR i gumbrina. – Baku: Izd-vo AN Azerb.SSR, 1957. – 263 s. [Zulfugarov Z.G. Investigation of the physicochemical properties and bleaching ability of clays from the deposits of the Azerbaijan SSR and Gumbrin. - Baku: Publishing House of the Academy of Sciences of Azerbaijan SSR, 1957. 263 p. (In Russ.)]
20. D.M. Roy, Alkali-activated cements. Opportunities and challenges, Cement and Concrete Research. - №29 (1999) pp. 249–254.

21. Ö. Cizer, K. Van Balen, D. Van Gemert, Competition between hydration and carbonation mortars, *Advanced Materials Research*. - t Vol / 133–134 (2010) p. 241–246.
22. Breck, D.W. *Zeolite Molecular Sieves*. // J. Wiley. - New York, 1974. - 771 pp.
23. Elert, K., Sebastián, E., Valverde, I., Rodriguez-Navarro, C., 2008. *Alkaline Treatment of Clay Minerals Applied Clay Science* 39, pp. 122–132.
24. E. Doehne, C.A. Price, *Stone Conservation - An Overview of Current Research*, The Getty Conservation Institute. - Los Angeles, 2010. - 174 pp.
25. Mameshov R.T., Ivashchenko YU.G. Gruntobeton na osnove smeshannykh vyazhushchikh / Mameshov R.T.// Zhurnal «Promyshlennost' Kazakhstana». 2017. № 1(100). S. 82-99. [Mameshov RT, Ivashchenko Yu.G. Concrete on the basis of mixed binders / Mameshov RT // *Industry Kazakhstan magazine*. 2017. No. 1 (100). pp. 82-99. (In Russ.)]
26. Mameshov R.T., Ivashchenko YU.G. Issledovaniye vozmozhnosti polucheniya geopolimernykh kompozitov na osnove khimicheskii aktivirovannogo glinistogo syr'ya i organicheskoy dobavki // Sbornik nauchnykh trudov «Resursoenergoeffektivnyye tekhnologii v stroitel'nom komplekse regiona». – Saratovskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet im. Gagarina YU.A. Tom 2. S. 105-110. [Mameshov RT, Ivashchenko Yu.G. Study of the possibility of obtaining geopolymer composites based on chemically activated clay raw materials and organic additives // *Collection of scientific works "Resource-energy efficient technologies in the building complex of the region"*. - Saratov State Technical University. Gagarin Yu.A. Volume 2. pp. 105-110. (In Russ.)]

Сведения об авторах:

Ивашенко Юрий Григорьевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Строительные материалы и технологии».

Мамешов Раман Тайрович – аспирант, кафедра «Строительные материалы и технологии».

Мухамбеткалиев Кайрат Куаншкалиевич – кандидат технических наук, доцент, заместитель руководителя управления энергетики и ЖКХ Западно-Казахстанской области.

Information about the authors:

Yuriy G. Ivaschenko – Dr. Sci. (Technical), Prof., Head of the Department of «Building materials and technology».

Raman T. Mameshov – Graduate student, Department of «Building materials and technology».

Kayrat K. Mukhambetkaliyev – Cand. Sci. (Technical), Assoc. Prof., Deputy Head of the Department of Energy and Housing and Communal Services of the West Kazakhstan Region.

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 01.09.2018.

Принята в печать 25.09.2018.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 01.09.2018.

Accepted for publication 25.09.2018.

Для цитирования: Муселемов Х.М., Устарханов О.М., Юсупов А.К. Вероятностный расчет сейсмостойкости здания на кинематических опорах. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2018; 45(3):194-211. DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-3-194-211

For citation: Muselemov Kh.M., Ustarkhanov O.M., Yusupov A.K. Probable calculation of building seismic resistance on kinematic support. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2018; 45 (3):194-211. (In Russ.) DOI: 10.21822/2073-6185-2018-45-3-194-211

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

УДК 699.8

DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-3-194-211

ВЕРОЯТНОСТНЫЙ РАСЧЕТ СЕЙСМОСТОЙКОСТИ ЗДАНИЯ НА КИНЕМАТИЧЕСКИХ ОПОРАХ

Муселемов Х.М.³, Устарханов О.М.¹, Юсупов А.К.²

¹⁻³ Дагестанский государственный технический университет,

¹⁻³ 367026, г. Махачкала, пр. Имама Шамиля, 70, Россия,

¹e-mail:dgtu.pgs@mail.ru, ²e-mail:abusupk@mail.ru, ³e-mail: hairulla213@mail.ru

Резюме. Цель. В статье отражены результаты численного анализа работы сейсмостойкого здания на кинематических опорах. С этой целью задача приводится к решению нелинейной стохастической задачи Коши. Решение строится методом последовательных приближений. Вероятностные характеристики колебания здания определяются без применения приемов линеаризации. Дается алгоритм решения этой задачи, который позволяет выполнять численные эксперименты на компьютере для исследования работы сейсмостойкого здания на кинематических опорах. **Метод.** Ускорение поверхности земли при землетрясении представляется в виде нестационарного случайного гауссовского процесса. В настоящее время такой подход считается общепризнанным и не вызывает сомнения. Исследование колебаний здания на кинематических опорах при воздействии сильных землетрясений сводится к решению стохастического нелинейного уравнения Коши. Это уравнение решается методом итерации. Ускорение поверхности земли представляется функцией трех случайных величин. Искомая вероятность представляется в виде трехкратного интеграла, который вычисляется с применением компьютера. **Результат.** Приводятся основные сведения о рассматриваемых кинематических опорах. Формулируется задача Коши для случая колебаний сейсмостойкого здания на кинематических опорах при воздействии сильных землетрясений. Подробно излагается алгоритм, позволяющий решать это уравнение. Вероятность нахождения перемещений здания в определенных пределах представляется в виде трехкратного интеграла. Даются результаты численных экспериментов, проведенных на компьютере. Строятся соответствующие графики с использованием реальных акселерограмм сильных землетрясений, которые произошли в городах Тафт (США) и Газли (Узбекистан). **Вывод.** В настоящей статье изложена методика расчета сейсмостойкого здания на кинематических опорах, с использованием данных реальных сильных землетрясений. По результатам численных экспериментов, проведенных на компьютере, построены графики надежности сейсмостойкости здания при землетрясениях. Построенный алгоритм и разработанная методика могут быть использованы при расчете и проектировании сейсмостойких зданий, как на обычных опорах, так и на опорах кинематических.

Ключевые слова: нестационарный случайный процесс, кинематические опоры, стохастическое уравнение, итерации, вероятность, частота, сейсмостойкость здания

TECHNICAL SCIENCE
BUILDING AND ARCHITECTURE

PROBABLE CALCULATION OF BUILDING SEISMIC RESISTANCE
ON KINEMATIC SUPPORT

Hayrulla M. Muselemov³, Osman M. Ustarkhanov¹ Abusupyan K. Yusupov²

^{1,3}Daghestan State Technical University,

^{1,3}70 I. Shamil Ave., Makhachkala 367026, Russia,

¹e-mail: dgtu.pgs@mail.ru, ² e-mail: abusupk@mail.ru, ³ e-mail: hairulla213@mail.ru

Abstract. Objectives. The article reflects the results of the numerical analysis of the earthquake-resistant building on kinematic supports. To this end, the problem is reduced to solving the nonlinear stochastic Cauchy problem. The solution is constructed by the method of successive approximations. The probabilistic characteristics of the oscillation of the building are determined without the use of linearization techniques. An algorithm for solving this problem, which allows to perform numerical experiments on a computer to study the operation of a earthquake-resistant building on kinematic supports, is given. **Method.** The acceleration of the earth's surface during an earthquake is represented as a non-stationary random Gaussian process. This approach is now generally accepted and beyond doubt. The study of vibrations of the building on kinematic supports under the influence of strong earthquakes is reduced to the solution of the stochastic nonlinear Cauchy equation. This equation is solved by iteration. The acceleration of the earth's surface is a function of three random variables. The required probability is represented as a triple integral, which is calculated using a computer. **Result.** The basic information about the considered kinematic supports is given. The Cauchy problem is formulated for the case of oscillations of a earthquake-resistant building on kinematic supports under the influence of strong earthquakes. The algorithm allowing to solve this equation is described in detail. The probability of finding the movements of the building within certain limits is represented as a triple integral. The results of numerical experiments carried out on a computer are given. The corresponding graphs are constructed using real accelerograms of strong earthquakes that occurred in the cities of Taft (USA) and Gazli (Uzbekistan). **Conclusion.** This article describes the method of calculation of earthquake-resistant buildings on kinematic supports, using the data of real strong earthquakes. Based on the results of numerical experiments conducted on a computer, graphs of the reliability of seismic stability of the building in earthquakes. The constructed algorithm and the developed technique can be used in the calculation and design of earthquake-resistant buildings both on conventional supports and on kinematic supports.

Keywords: non-stationary random process, kinematic supports, stochastic equation, iterations, probability, frequency, seismic stability of the building

Введение. В последнее время с целью обеспечения сейсмостойкости зданий широко применяются активные методы сейсмозащиты [1,2,7,9,10,11,14-17]. В частности, к таким активным методам относятся устройство кинематических опор, которое, как показывает опыт проектирования и строительства, по своим свойствам наиболее эффективно [14,17]. В настоящей статье приводятся результаты численных экспериментов по исследованию работы зданий на кинематических опорах [2,16,17] при воздействии сильных реальных землетрясений.

Наиболее эффективной системой сейсмической защиты зданий являются кинематические опоры (КО). Однако, здания на кинематических опорах получают во время землетрясения недопустимо большие перемещения. Поэтому эти опоры обычно применяются в сочетании с включающимися, выключающимися связями [2], или кинематическим опорам придают переменную кривизну [16,17]. При этом система, как расчетная схема, становится существенно нелинейной. И исследования работы сейсмостойкого здания, а также его расчет сводятся к построению решения нелинейной стохастической задачи Коши.

Постановка задачи. Требуется:

1. Построить алгоритм, позволяющий выполнить вероятностные расчеты многоэтажного здания на кинематических опорах при сильных землетрясениях.
2. Кратко изложить особенности работы кинематических опор и его свойства;
3. Сформулировать дифференциальное уравнение колебаний здания при землетрясении;
4. Построить алгоритм решения этого уравнения без использования приемов линеаризации;
5. Привести в качестве примеров численные эксперименты на компьютере и соответствующие графики;
6. Сформулировать выводы.

Методы исследования. Особенности работы кинематических опор и их свойства. Свойства кинематической опоры (КО) гасить сейсмические силы определяются зависимостью силы F (рис. 1) от горизонтальных перемещений y .

На рис.1.б. показана схема движения КО под воздействием силы F , на рис. 1.а – неподвижное состояние. Поверхность качения опоры разбивается на отдельные участки, каждый из которых имеет свою длину ∇_i и радиус кривизны R_i . [17]. Здесь, пропуская геометрические построения и математические выкладки, мы приводим окончательные выражения.

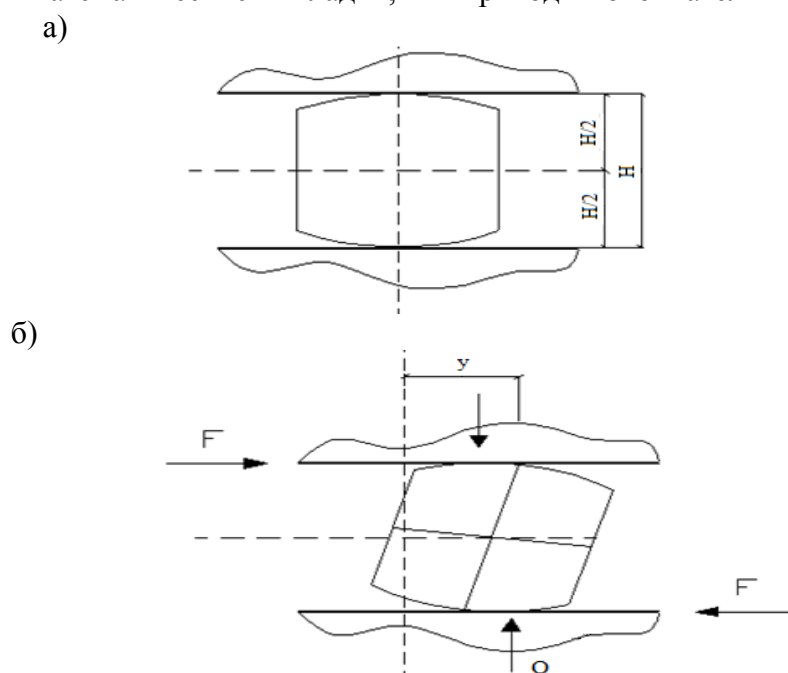


Рис. 1. Схема перемещения кинематической опоры во время землетрясения:

Fig. 1. Scheme of movement of the kinematic support during an earthquake:

На первом участке:

$$F(y) = Q \cdot \bar{F}(y) \quad (1)$$

$$\bar{F}(y) = \frac{2R_1 - H}{H^2} \cdot y, \quad (1.a.)$$

$$\text{где } 0 \leq |y| \leq \frac{V_0}{R_1} \cdot H, \quad (2)$$

Q – вертикальная нагрузка – вес всего здания.

На втором участке:

$$F(y) = Q \cdot \bar{F}(y), \quad (3)$$

$$\bar{F}(y) = \text{sign } y \cdot \left[\frac{2R_2 - H}{H^2} \cdot |y| - \frac{2(R_2 - R_1)}{H^2} \cdot \bar{V}_1 \right], \quad (3.a.)$$

$$\text{где } V_1 \leq |y| \leq \bar{V}_2; \quad (4)$$

$$\text{sign } y = \begin{cases} 1 & \text{при } y > 0, \\ 0 & \text{при } y = 0, \\ -1 & \text{при } y < 0. \end{cases}$$

$$\bar{V}_1 = \frac{V_0}{R_1} \cdot H; \quad \bar{V}_2 = \left(\frac{V_0}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} \right) \cdot H \quad (5)$$

На третьем участке:

$$F(y) = Q \cdot \bar{F}(y) \quad (6)$$

$$\bar{F}(y) = \text{sign } y \cdot \left[\frac{2R_3 - H}{H^2} \cdot |y| - \frac{2(R_3 - R_2)}{H^2} \cdot \bar{V}_2 - \frac{2(R_2 - R_1)}{H^2} \cdot \bar{V}_1 \right], \quad (6.a)$$

где $\bar{V}_2 \leq |y| \leq \bar{V}_3;$ (7)

$$\bar{V}_3 = \left(\frac{V_0}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \frac{V_3}{R_3} \right) \cdot H. \quad (8)$$

На четвертом участке:

$$F(y) = Q \cdot \bar{F}(y), \quad (9)$$

$$\bar{F}(y) = \text{sign } y \cdot \left[\frac{2R_4 - H}{H^2} \cdot |y| - \frac{2(R_4 - R_3)}{H^2} \cdot \bar{V}_3 - \frac{2(R_3 - R_2)}{H^2} \cdot \bar{V}_2 - \frac{2(R_2 - R_1)}{H^2} \cdot \bar{V}_1 \right], \quad (9.a)$$

где $\bar{V}_3 \leq |y| \leq \bar{V}_4;$ (10)

$$\bar{V}_4 = \left(\frac{V_0}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \frac{V_3}{R_3} + \frac{V_4}{R_4} \right) \cdot H. \quad (11)$$

На каждом участке функция $F(y)$ представляет собой линейную функцию, то есть её график имеет вид прямой.

График функции в диапазоне, охватывающем все 4 участка, имеет вид ломаной (рис.2). Другими словами, зависимость $F(y)$ является кусочно-линейной функцией.

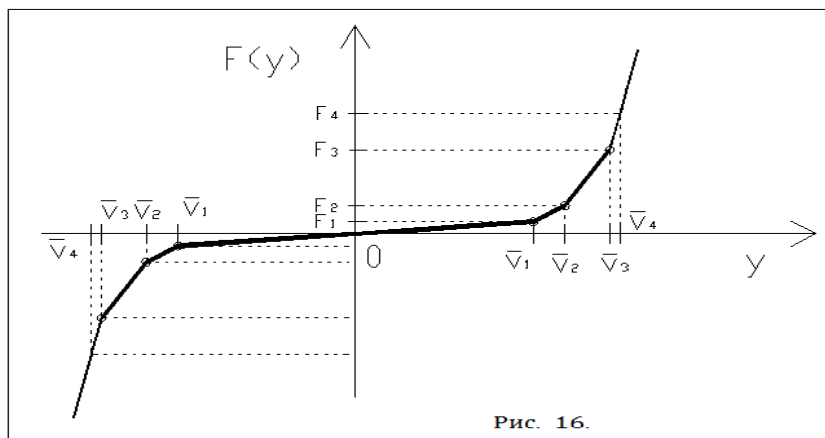


Рис.2. Зависимость горизонтальной силы от перемещений

Fig.2. Dependence of horizontal force on displacements

Подробности построения этого графика изложены в [17].

Дифференциальное уравнение колебаний здания при землетрясениях. Любая динамическая система характеризуется спектром частот собственных колебаний. Численные эксперименты, проведенные нами на компьютере [16], свидетельствуют о том, что многоэтажное здание на кинематических опорах колеблется как абсолютно жесткое тело, то есть как одномассовая система: горизонтальные перемещения по высоте здания отличаются друг от друга не более чем

на один, два процента; влияние вторых и третьих форм колебаний ничтожно мало. Это позволяет нам, с высокой точностью, рассматривать здание на кинематических опорах, как систему с одной степенью свободы.

Поэтому определение динамических характеристик здесь сводится к вычислению частоты собственных колебаний одномассовой системы.

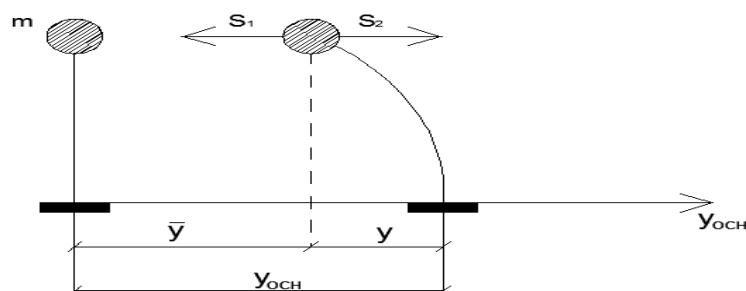


Рис. 3. Схема колебаний одномассовой системы при землетрясениях
Fig. 3. Scheme of oscillations of a single-mass system during earthquakes

Воспользуемся общепринятой схемой [2,14]. На рис.3. показана схема колебаний здания, как системы с одной степенью свободы. При движении массы m (см. рис.3.) на неё действуют инерционная сила (сила Даламбера)

$$S_1 = m \cdot \bar{y}'' \quad (12)$$

и реакция отпора S_2 , обусловленная жесткостью системы. Сила

$$S_2 = F(y). \quad (13)$$

Здесь:

m - масса всего здания с учетом массы неподвижного оборудования, мебели, книг и т.д.;

$y = y(t)$ – горизонтальные перемещения массы (рис.3.), обусловленные деформациями системы;

$\bar{y}_{осн} = y_{осн}(t)$ – перемещения поверхности земли при землетрясении.

Очевидно (рис. 3)

$$\bar{y} = y_{осн} - y, \quad (14)$$

где:

$\bar{y}$ – перемещения здания относительно своего первоначального состояния покоя. Из условия равновесия массы m (рис.3.) следует, что

$$S_1 - S_2 = 0.$$

Или с учетом (3.1) и (3.2)

$$m \cdot \bar{y}'' - F(y) = 0.$$

Если здесь заменить перемещения $\bar{y}$ разностью (14), то это уравнение примет вид

$$m \cdot y'' + F(y) = m \cdot y''_{осн}. \quad (15)$$

После введения члена, учитывающего затухание колебаний, уравнение (15) можно представить так :

$$y'' + 2\gamma \cdot \omega \cdot y' + \frac{1}{m} \cdot F(y) = W(t),$$

или

$$y'' + 2 \cdot \gamma \cdot \omega \cdot y' + g \cdot \bar{F}(y) = W(t), \quad (16)$$

где γ - коэффициент, учитывающий демпфирование системы;

ω - частота собственных колебаний системы;

g – ускорение свободного падения;

функция

$$W(t) = y''_{осн}(t). \quad (17)$$

Как было отмечено выше, здание на КО при колебаниях ведет себя как одномассовая система, то есть ведет себя, как абсолютно твердое тело. Поэтому коэффициент γ , входящий в уравнение (16), очень мал, практически он равен нулю. Затухание колебаний здания происходит за счет сил трения качения, которые возникают на поверхностях контакта КО и элементов верхней и нижней обвязок. Силу трения качения $F_{тр}$ определим так:

$$F_{мп} = Q \cdot \bar{F}_{мп}(y'); \quad (18)$$

$$\bar{F}_{мп} = \frac{f_0}{R_1} \cdot \text{sign} y'.$$

Здесь: Q – вес всего здания без учета веса цокольного этажа.

f_0 – коэффициент трения качения, для гладких бетонных поверхностей.

$$f_0 = (0,05 \div 0,1) \text{ м};$$

R_1 – радиус кривизны первого участка (об участках см. в [9,10,17]).

Единица измерения f_0 и R_1 одна и та же (см; м).

Здесь: $W(t) = y''_{осн}$ – ускорение поверхности земли при землетрясении, которое представляет собой нестационарный случайный процесс. Определение всех его статистических характеристик излагается в статье [8].

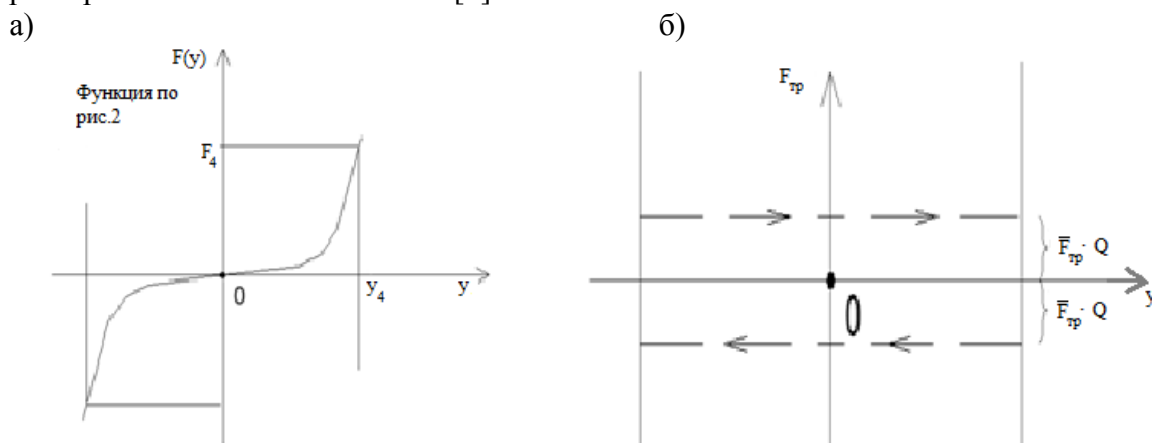


Рис. 4. Графики силы при качении кинематической опоры

а) график реактивной силы; б) график силы трения

Fig. 4. Plots of force when rolling kinematic support

а) a graph of reactive power; б) graph of friction force

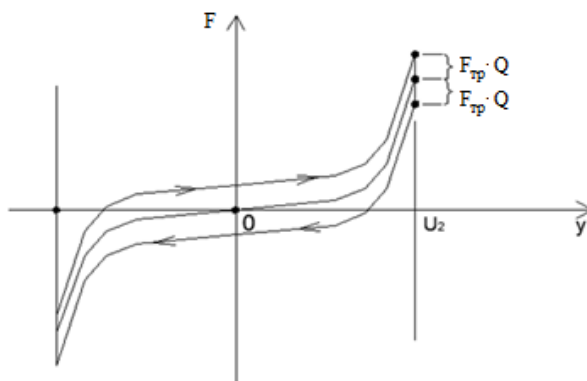


Рис. 5. Суммарный график, построенный по рис. 4

Fig. 5. The total schedule constructed according to fig.4

$$F = \bar{F}(y) + \bar{F}_{тр} \cdot Q.$$

Обобщенная функция

$$\text{sign} y' = \begin{cases} 1 & \text{при } y' > 0, \\ 0 & \text{при } y' = 0, \\ -1 & \text{при } y' < 0. \end{cases} \quad (19)$$

График функции F_{mp} (18) показан на рис.4. Таким образом, полная реакция КО складывается из двух составляющих:

$$F(y) + F_{mp}(y') = Q \cdot \bar{F}(y) + Q \cdot \bar{F}_{mp}(y'). \quad (20)$$

Теперь, с учетом сил трения качения, уравнение (16) можно уточнить:

$$y'' + 2\gamma \cdot \omega \cdot y' + g \cdot [\bar{F}(y) + \bar{F}_{тр}(y')] = W(t), \quad (21)$$

где g – ускорение свободного падения;

$\bar{F}(y)$ – даны выражениями (1.а), (3.а), (6.а) и (9.а).

Как показали исследования, с использованием программы Лира, в детерминированной постановке задачи, многоэтажное здание на кинематических опорах колеблется как одномассовая система: перемещения здания происходят за счет качения кинематических опор. Все перемещения сосредотачиваются в уровне этажа, где располагаются кинематические опоры [16].

Поскольку здание колеблется как одна массовая система, как следует из уравнения (21), перемещения y не зависят от конструктивной схемы, этажности, массы здания. Эти перемещения зависят только от геометрических параметров КО (кинематические опоры) и особенностей спектральной плотности ускорения поверхности земли при землетрясении.

Алгоритм решения

Для того чтобы определить сейсмические силы, необходимо построить решение дифференциального уравнения (21).

Выпишем уравнение (21):

$$y'' + 2 \cdot \gamma \cdot \omega \cdot y' + g \cdot [\bar{F}(y) + \bar{F}_{mp}(y')] = W(t). \quad (22)$$

Здесь все параметры и функции, кроме перемещений $y(t)$, определены в предыдущих пунктах: $\bar{F}(y)$ и $\bar{F}_{mp}(y')$ даны формулами (1.а), (3.а), (6.а) и (9.а), [16], а функция $W(t)$ приводится в статье [8]. Нас интересует неоднородное решение $y(t)$ уравнения (22) при однородных начальных условиях:

$$y(0) = y'(0) = 0. \quad (22.a)$$

В уравнении (22) функция $W(t)$ – нестационарный случайный процесс [4,5,14].

Дифференциальное уравнение (22) и начальное условие (22.а) представляют с собой нелинейную стохастическую задачу Коши.

Поскольку уравнение (22) содержит существенно нелинейные звенья, то речь может идти только о построении приближенного решения.

Запишем уравнение (22) в следующем виде:

$$\begin{aligned} y'' + 2 \cdot \gamma \cdot \omega \cdot y' + \omega^2 \cdot y &= \\ &= W(t) + \omega^2 \cdot y - g \cdot [\bar{F}(y) + \bar{F}_{тр}(y')] \end{aligned} \quad (23)$$

где квадрат частоты собственных колебаний вычисляется по формуле,

$$\omega^2 = \frac{2g}{3} \cdot \left[\bar{F}\left(\frac{\Delta}{2}\right) + \bar{F}(\Delta) \right], \quad (24)$$

где Δ - постоянная амплитуда при собственных колебаниях нелинейной консервативной системы. Погрешности в величине частоты, вычисляемые по формуле (24), не превышают [3] одного процента.

Теперь равенство (23) представим в виде интегрального уравнения :

$$y(t) = \int_{-\infty}^t G(t-\tau) \cdot \{W(\tau) + \omega^2 \cdot y(\tau) - g \cdot (\overline{F}[y(\tau)] + \overline{F}_{mp}[y'(\tau)])\} d\tau, \quad (25)$$

где ядро

$$G(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t \leq 0, \\ (\omega \cdot \gamma_0)^{-1} \cdot \exp(-\gamma \cdot \omega \cdot t) \cdot \sin(\omega \cdot \gamma_0 \cdot t) & \text{при } t > 0 \\ \gamma_0 = \sqrt{1 - \gamma^2}, \end{cases} \quad (26)$$

является решением уравнения

$$G'' + 2\gamma \cdot \omega \cdot G' + \omega^2 \cdot G = \delta(t) \quad (27)$$

при однородных начальных условиях; в уравнении (27)

$\delta(t)$ – дельта-функция.

Сравните левые части уравнений (23) и (27).

Поскольку искомая функция $y(t)$ входит в подынтегральное выражение, то уравнение (25) необходимо записать в итерационном режиме:

$$y_{n+1}(t) = Y_n(t) + \omega_n^2 \cdot \int_{-\infty}^t G_n(t-\tau) \cdot y_n(\tau) d\tau - g \cdot \int_{-\infty}^t G_n(t-\tau) \cdot (\overline{F}[y_n(\tau)] + \overline{F}_{mp}[y'_n(\tau)]) d\tau \quad (28)$$

$$\text{Здесь} \quad Y_n(t) = \int_{-\infty}^t G_n(t-\tau) \cdot W(\tau) d\tau; \quad (29)$$

Формулу (24) также запишем в итерационном режиме:

$$\omega_n^2 = \frac{2g}{3\Delta_n} \cdot \left[\overline{F}\left(\frac{\Delta_n}{2}\right) + \overline{F}_{mp}(\Delta_n) \right]; \quad (30)$$

$$\Delta_n = \Delta_0 + |y_{n, \max}| \quad (31)$$

$$G_n(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t \leq 0, \\ (\omega_n \cdot \gamma_0)^{-1} \cdot \exp(-\gamma \cdot \omega_n \cdot t) \cdot \sin(\omega_n \cdot \gamma_0 \cdot t) & \text{при } t > 0, \\ \gamma_0 = \sqrt{1 - \gamma^2}. \end{cases} \quad (32)$$

В выражениях (28) – (32) $n = 0, 1, 2, 3, \dots$ – шаг итераций.

Далее мы излагаем процесс итераций. Next, we describe the process of iterations.

Нулевой шаг: $n = 0$. При $n = 0$ принимаем $y_0 = 0$, $y_{0, \max} = 0$, назначаем величину $\Delta_0 = V_1$. Система колеблется в пределах первого участка, система линейна.

По формуле (31) вычисляем

$$\Delta_0 = V_1.$$

Затем по формуле (30) вычисляем ω_0^2 . Далее, при уже известном ω_0^2 , определяем функцию $G_0(t)$ – (26).

Затем с помощью интеграла (29) вычисляем $Y_0(t)$, после чего из выражения (28), при $y_0 \equiv 0$ находим

$$y_1(t) = Y_0(t). \quad (33)$$

Далее вычисляем значения найденной функции $y_1(t_i)$:

если землетрясение происходит за время T_0 , скажем за $T_0 = 30 \div 60$ с, то разбиваем его на равные временные отрезки

$$\Delta_t = \frac{\pi}{10 \cdot \Omega}$$

(Ω – доминантная частота процесса, $W(t)$ – ускорение поверхности земли).

$$\text{Поэтому} \quad y_1(t_i) : t_i = \frac{i \cdot \pi}{10 \cdot \Omega}, \quad (34)$$

$$i = 0, 1, 2, 3, \dots, \frac{10 \cdot \Omega \cdot T_0}{\pi}.$$

Из множества ординат $y_1(t_i)$ определяем наибольшую ординату по абсолютной величине $|y_1(t_i)|$, которую обозначаем $y_{1, \max}$.

Если $y_{1, \max} < \Delta_0 = \bar{V}_1$, то найденное решение (33) – окончательное, итерационный процесс сошелся. Это обычно происходит, если наибольшие амплитуды колебаний поверхности земли по своей абсолютной величине не превышают $\bar{V}_1$.

Если наибольшие амплитуды ожидаемого землетрясения больше $\bar{V}_1$, то лучше назначить параметр $\bar{V}_1$ так, чтобы он был больше ожидаемой наибольшей амплитуды. Тогда вместо принятого здесь значения $\bar{V}_1 = 14 \text{ см}$ будет другое значение, скажем, 16 см . В любом случае прогноз величины наибольшей амплитуды перемещений поверхности земли носит вероятностный характер, и превышения ожидаемого значения возможно.

Поэтому необходимо в конструкции КО иметь вторые, третьи, четвертые участки с меньшей кривизной, чтобы ограничить развитие больших перемещений. Многочисленные исследования, проведенные нами на компьютере, говорят о том, что иногда наибольшие перемещения здания Y доходят до второго участка, но не далее. Это значит, что если $y_{1, \max} > \Delta_0 = \bar{V}$

1 , то необходимо выполнить следующее приближение. Мы не знаем заранее, чему будет равно Δ . Поэтому лучше принимать для начала $\mathcal{E} = 0,5$; затем менять $\mathcal{E}$ вокруг него:

$\mathcal{E} = 0,5; (0,4; 0,6); (0,3; 0,7); (0,2; 0,8); (0,1; 0,9); (0,0; 1,0)$.

С учетом сказанного, примем

$$\Delta = \bar{V}_1 + 0.5 \cdot \bar{V}_2.$$

Тогда по формуле (30) найдем квадрат частоты

$$\omega^2 = \frac{2 \cdot g}{3 \cdot \Delta} \cdot \left[F\left(\frac{\Delta}{2}\right) + F(\Delta) \right], \quad (35)$$

а функцию Грина (32) запишем так:

$$G(t) = \begin{cases} 0, & \text{при } t \leq 0, \\ (\omega \gamma_0)^{-1} \cdot \exp(-\gamma \omega t) \cdot \sin(\omega \cdot \gamma_0 t) & \text{при } t > 0, \\ \gamma_0 = \sqrt{1 - \gamma^2}. \end{cases} \quad (36)$$

Далее, подставляя выражение (13) из статьи [8] в интеграл (29), запишем

$$\begin{aligned} Y(t) &= Y(\omega, p, u, \theta, t) = \\ &= B \cdot p \cdot \int_{-\infty}^t G(t-\tau) \tau \cdot e^{-\varepsilon \tau} \cdot \cos \theta \cdot \tau \cdot d\tau + B \cdot U \cdot \int_{-\infty}^t G(t-\tau) \cdot \tau \cdot e^{-\varepsilon \tau} \cdot \sin \theta \cdot \tau \cdot d\tau, \end{aligned} \quad (37)$$

где частота ω определяется по формуле (35).

Здесь и далее все функции являются функциями трех случайных величин p, u, θ , а время t играет роль параметра [8,17].

Перемещения $Y(t)$ определяются по формуле (37), пока $t \leq t^*$, где t^* – время подключения в работу второго участка кривизны КО, то есть время, когда начинается выполнение условия

$$|Y(t)| < \bar{V}_1 = \frac{V_0}{R_1} \cdot H;$$

При $t > t^*$ в работу подключается второй участок кривизны и перемещения определяются из итерационного уравнения (28), приняв в нём нижний предел интеграла равным t^* :

$$y_{n+1}(\omega_n, p, u, \theta, t) = Y(\omega_n, p, u, \theta, t) + \int_{t^*}^t G_n(t-\tau) \cdot \left\{ \omega_n^2 \cdot y_n(\omega_n, p, u, \theta, \tau) - g \cdot \left[\bar{F}(y_n(\omega_n, p, u, \theta, \tau)) + \bar{F}_{\text{тр}} \left(\frac{\partial}{\partial \tau} y_n(\omega_n, p, u, \theta, \tau) \right) \right] \right\} d\tau. \quad (38)$$

Здесь:

Y – функция (37); G_n – функция (32); частота ω_n во всех функциях определяется в итерационном режиме.

На первом шаге ($n=1$) лучше принять ω_1 , близкой к частоте ω , определяемой по формуле (35); далее с увеличением шага итерации « n » рекомендуется ω_n принять: если $\omega \approx 0,2$, то $\omega_1 = 0,4$; $\omega_2 = 0,6$, $\omega_3 = 0,8$ и т.д.

Окончательное значение « y » можно принять $y = y_k$, когда обеспечивается условие

$$\frac{|y_{k,\max} - y_{k-1,\max}|}{|y_{k,\max}|} \leq \varepsilon, \quad (39)$$

где ε – малая величина; $n = 0, 2, 3, \dots, k$; k – число всех итераций.

Итак:

перемещения здания

$$y = Y(\omega_n, p, u, \theta, t) \quad \text{при } t \leq t^* - \text{формула (37);}$$

$$y = y_k(\omega_n, p, u, \theta, t) \quad \text{при } t > t^* - \text{из уравнения (38).}$$

Теперь нетрудно записать выражение для вычисления вероятностной оценки

$$\begin{aligned} \Gamma_1 = \Gamma_1(t) &= P \left\{ -\bar{y}_0 \leq y(p, u, \theta, t) \leq \bar{y}_0 \right\} = \\ &= 4 \int_0^\infty \int_0^\infty f_3(p, u, \theta) \cdot e \left[\bar{y}_0 - |y(p, u, \theta, t)| \right] dp du d\theta. \end{aligned} \quad (40)$$

Здесь:

$f_3(p, u, \theta)$ – совместная плотность распределения вероятностей трех случайных параметров (подробности см. в книге [17] и в статье [8]); $\Gamma_1 = \Gamma_1(t)$ – гарантия.

Вычислив массив $\Gamma_1(t_i)$, где t_i – дискретные значения времени, следует выбрать наименьшее из всех значений: $\Gamma_{1, \min}(t_i)$. Эта величина и есть вероятность того, что перемещения $|y|$ не превзойдут некоторого значения $\bar{y}_0$.

Величину $\bar{y}_0$ можно принять равной $\bar{V}_1$: $\bar{y}_0 = \bar{V}_1$.

Для определения сейсмической силы можно записать формулу:

$$S_1 = S_1(p, u, \theta, t) = Q \cdot \bar{F}[y(p, u, \theta, t)] + Q \cdot \bar{F}_{mp}[y'(p, u, \theta, t)],$$

где перемещения $y(p, u, \theta, t)$ даются выражением (38), а функции $\bar{F}(y)$ и $\bar{F}_{mp}$ – формулами (1.a), (3.a), (6.a) и (9.a).

Теперь вероятность [6,12,13]

$$\begin{aligned} \Gamma_2 = \Gamma_2(t) = P \{ -\bar{S}_1 \leq S_1(p, u, \theta, t) \leq \bar{S}_1 \} = \\ = 4 \int_0^\infty \int \int f_3(p, u, \theta, t) \cdot e^{[\bar{S}_1 - |S_1(p, u, \theta, t)|]} du dp d\theta, \end{aligned} \quad (41)$$

где единичная функция

$$e(t) = \begin{cases} 1 & \text{при } t \geq 0, \\ 0 & \text{при } t < 0. \end{cases}$$

Параметры $\bar{S}_1$ и $\bar{y}_0$, входящие в выражения (40) и (41), нормируемые величины, назначаемые по условиям 1-ой и 2-ой групп предельных состояний. По формуле (41) вычисляется массив $\Gamma_2(t_i)$ для всех значений t_i – равенство (34). Как и в случае перемещения, из этого массива находим $\Gamma_{2, \min}(t_i)$. Эта величина является вероятностью нахождения в пределах нормы $\bar{S}_1$ сейсмической силы на здание.

Для уникальных зданий и сооружений повышенной ответственности можно принять

$$\left. \begin{matrix} \Gamma_{1, \min} \\ \Gamma_{2, \min} \end{matrix} \right\} \geq 0,999 = \Gamma_{\text{норма}}, \quad (42)$$

для обычных зданий и сооружений средней ответственности

$$\left. \begin{matrix} \Gamma_{1, \min} \\ \Gamma_{2, \min} \end{matrix} \right\} \geq 0,995 = \Gamma_{\text{норма}}, \quad (43)$$

для зданий и сооружений, где исключены жертвы при аварии

$$\left. \begin{matrix} \Gamma_{1, \min} \\ \Gamma_{2, \min} \end{matrix} \right\} \geq 0,99 = \Gamma_{\text{норма}}. \quad (44)$$

Как поступать, если окажется, что вычисленные гарантии $\Gamma_{1, \min}$ и $\Gamma_{2, \min}$ нас не удовлетворяют?

В таком случае следует менять, если возможно, нормируемые параметры $\bar{y}_0$ и $\bar{S}_1$, входящие в выражения (40) и (41). Если это невозможно по эксплуатационным требованиям,

то следует, как уже отмечалось выше, менять параметр N и кривизну КО (кинематической опоры).

Относительно сейсмической силы заметим еще следующее: гарантию не превышения сейсмической силой S_1 некоторого нормируемого уровня $\bar{S}_1$ можно вычислить с помощью интегралов (41). Но можно поступить и иначе. Если $\bar{V}_1$ (в случае линейных колебаний) или $\bar{V}_2$ (в случае нелинейных колебаний) уже определены из условия (40) и (41), то сейсмическую силу S_1 , соответствующей гарантии $\Gamma_{1,\min}(t_i)$ условие (41), - можно определить по формуле (20), заменив в ней прогибы y величиной $\bar{V}_1$ или $\bar{V}_2$ - в зависимости от того, колебания - линейные или нелинейные.

Другими словами, из формулы (20) имеем:

$$S_1 = Q \cdot [\bar{F}(y) + \bar{F}(y')] \quad \text{при} \quad y = \begin{cases} \bar{V}_1 \\ \bar{V}_2 \end{cases} . \quad (45)$$

Здесь: $\bar{F}(y)$, $\bar{F}_{mp}(y^1)$ - функции (1.а), (3.а), (18).

Должно быть

$$|S| \leq \bar{S}_1, \quad (46)$$

где $\bar{S}_1$ -нормируемая величина (см. формулу 41).

Комментарии к вычислительной процедуре (37), (38), (40).

Вернемся к выражениям (37) и (38). Двухкратный интеграл (38) содержит осциллирующие функции. Причем, частоты θ могут меняться случайным образом в широком диапазоне. Это значит, что точность вычислений интегралов (38) будет невысокой.

Чтобы обеспечить высокую точность, необходимо назначать очень маленький шаг при численном интегрировании. А если учесть, что интегралы (38) к тому же еще и двухкратные, то нетрудно представить себе трудности, с которыми приходится сталкиваться при численной реализации на компьютере интегралов (38). Поэтому лучше всего интегралы (37) раскрыть и представить их в виде аналитических функций. Тогда интегралы (38) становятся однократными, необходимые вычисления уменьшаются на порядок, а точность вычислений существенно возрастает.

Интегралы, входящие в выражение (37) – табличные. Однако, при раскрытии их получаются громоздкие выражения.

Мы выполнили все необходимые преобразования, упорядочили и тщательно проверили результаты. Пропуская все промежуточные операции, ниже мы приводим окончательную функцию перемещений

$$Y(p, u, \theta, t),$$

которая получается при раскрытии интегралов (37):

$$\begin{aligned} Y(p, u, \theta, t) &= \\ &= \frac{B}{\omega \gamma_0} e^{-\gamma \omega t} \cdot [(p \cdot I_1 + u \cdot I_3) \cdot \sin \gamma_0 \omega \cdot t - (p \cdot I_2 + u \cdot I_4) \cdot \cos \gamma_0 \omega \cdot t]. \end{aligned} \quad (47)$$

$t \in (0; \infty)$.

Здесь для краткости введены следующие обозначения:

$$\begin{aligned} \gamma_0 &= \sqrt{1 - \gamma^2}; \quad a = \gamma \cdot \omega - \varepsilon; \quad \varepsilon = \omega \cdot \gamma_0 - \theta; \\ \varepsilon_0 &= \omega \cdot \gamma_0 + \theta; \quad a^2 + \varepsilon^2 = c_1; \quad a^2 - \varepsilon^2 = c_2; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}a^2 + \vartheta_0^2 &= c_3; \quad a^2 - \vartheta_0^2 = c_4; \\d_1 &= a \cdot c_1 \cdot t - c_2; \quad d_2 = \vartheta \cdot c_1 \cdot t - 2a\vartheta; \quad d_3 = a \cdot c_3 \cdot t - c_4; \\d_4 &= \vartheta_0 \cdot c_3 \cdot t - 2a\vartheta_0; \\I_1 &= I_1 + I_1^0; \quad I_2 = I_2 + I_2^0; \quad I_3 = I_2^0 - \bar{I}_2; \\I_4 &= \bar{I}_1 - I_1^0; \\\bar{I}_1 &= \bar{I}_1(\theta, t) = \frac{e^{at}}{2 \cdot c_1^2} \cdot (d_1 \cos \vartheta t + d_2 \sin \vartheta t) + \frac{c_2}{2 \cdot c_1^2}; \\I_1^0 &= I_1^0(\theta, t) = \frac{e^{a \cdot t}}{2 \cdot c_3^2} \cdot (d_3 \cos \vartheta_0 t + d_4 \sin \vartheta_0 t) + \frac{c_4}{2 \cdot c_3^2}; \\\bar{I}_2 &= \bar{I}_2(\theta, t) = \frac{e^{a \cdot t}}{2 \cdot c_1^2} \cdot (d_1 \sin \vartheta t - d_2 \cos \vartheta t) - \frac{a\vartheta}{c_1^2}; \\I_2^0 &= I_2^0(\theta, t) = \frac{e^{a \cdot t}}{2 \cdot c_3^2} \cdot (d_3 \sin \vartheta_0 t - d_4 \cos \vartheta_0 t) - \frac{a\vartheta_0}{c_3^2}.\end{aligned}$$

В этих формулах параметры d_1, d_2, d_3, d_4 являются линейными функциями времени t – см. обозначения.

Обсуждение результатов. Ниже приводятся результаты численных экспериментов на компьютере, которые получены по алгоритму (37), (38), (40).

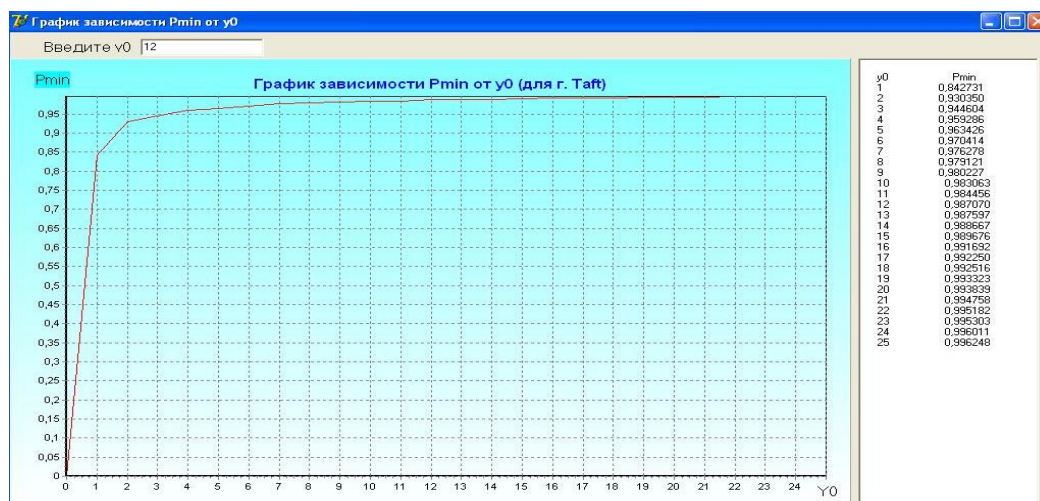
В качестве исходных данных были использованы акселерограммы реальных землетрясений по **Газли** и **Taft**. Корреляционные функции и спектральные плотности, соответствующие этим землетрясениям, были построены и приведены в статье [8].

По этим численным экспериментам нами было построено множество графиков. Здесь, мы приводим некоторые графики вероятности не превышения перемещений здания некоторого нормированного значения.

Для данных по городу **Taft**

Исходные данные (вводимые)	
Параметры "геометрии" кинематической опоры (КО)	Статистические параметры акселерограммы землетрясения
H = 300 (см) - высота КО	W = 34,13 (1/см) - доминантная частота
R1 = 152 (см) - радиус кривизны 1 участка	T = 0,184 (см) - доминантный период колебаний земли
R2 = 600 (см) - радиус кривизны 2 участка	r = 12,8 (1/см) - коэффициент, характеризующий корреляцию
V2 = 3 (см) - длина 2 участка	E = 0,33 (1/см) - коэффициент
f0 = 0,03 - коэффициент трения качения	Гамма = 0,1

$$R2 = 600 \text{ см.}; \quad f0 = 0,03; \quad \rho = 12,8 \text{ 1/с}; \quad \Omega = 34,13 \text{ 1/с};$$



$y_0=1, 3, 6, 9, 12$ – для вычисления $P_{\min}$

Рис.6. График зависимости минимальной вероятности от перемещений
Fig.6. Graph of the minimum probability of movement

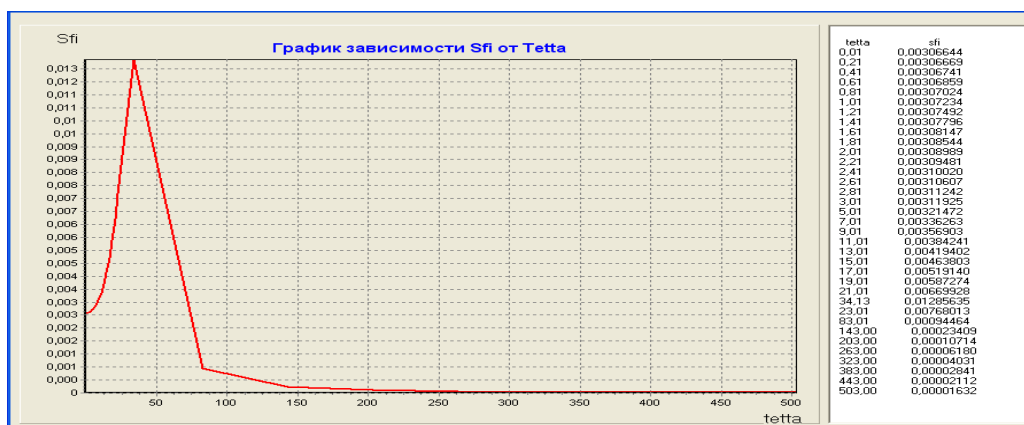


Рис.7. Спектральная плотность колебаний здания
Fig.7. The spectral density of the building

Для данных по городу Газли

Исходные данные (вводимые)	
Параметры "геометрии" кинематической опоры (КО)	Статистические параметры акселерограммы землетрясения
H = 300 (см) - высота КО	W = 78,5 (1/см) - доминантная частота
R1 = 152 (см) - радиус кривизны 1 участка	T = 0,08 (см) - доминантный период колебаний земли
R2 = 600 (см) - радиус кривизны 2 участка	г = 9,9 (1/см) - коэффициент, характеризующий корреляцию
V2 = 3 (см) - длина 2 участка	E = 0,142 (1/см) - коэффициент
f0 = 0,03 - коэффициент трения качения	Гамма = 0,1

$R_2=600$ см.; $f_0=0,03$; $\rho=9,9$ 1/с; $\Omega=78,5$ 1/с;

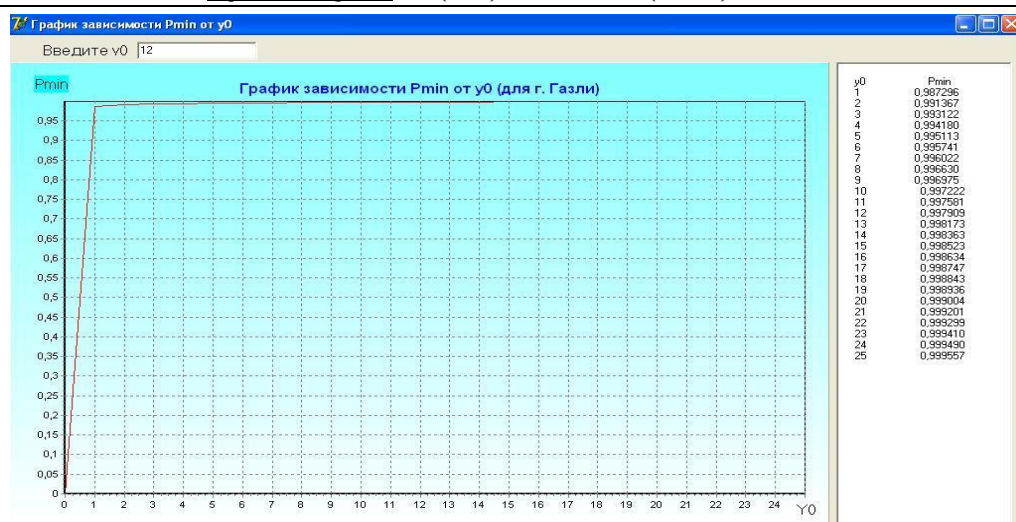


Рис.8. График зависимости минимальной вероятности от перемещений

Fig.8. Graph of the minimum probability of movement

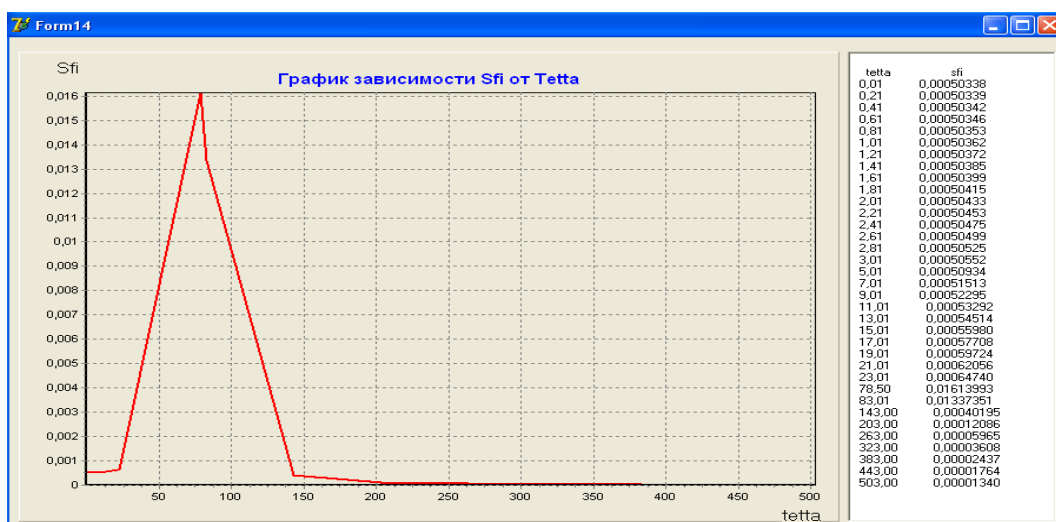


Рис.9. Спектральная плотность колебаний здания

Fig.9. The spectral density of the building

Вывод. Выше мы привели результаты численных экспериментов, полученные нами на компьютере. Число экспериментов и соответствующих им графиков достаточно велико, поэтому в данной статье мы приводим только сокращенный вариант.

Для всех вариантов были приняты

$R_1 = 152 \text{ см.}$ — радиус кривизны первого участка КО;

$R_2 = R_3 = R_4$ [см] — радиус кривизны второго участка, даётся в исходных параметрах

вариантов;

Y_0 [см] — уровень перемещения (по абсолютной величине), за который происходит выброс перемещений здания при землетрясении:

$$Y_0 = \frac{V_0}{R_1} \cdot H,$$

где $H=300$ см. — высота КО;

V_0 [см] — расчётная длина дуги по кривизне первого участка см. в книгу [17].

Этой дуге соответствует горизонтальное перемещение здания

$$YO = \bar{V}_1 - [17].$$

Полная конструктивная длина V_{II} дуги первого участка кривизны равна $V_{II} = 2V_k + 2V_0$.

Здесь: коэффициент 2 указывает на то, что полная конструктивная длина первого участка откладывается слева и справа от центральной точки A' ;

$2V_k$ – контактная длина дуги, идущая непосредственно по участку контакта поверхностей качения ($2V_k$ – определяется на основе известного решения задачи Герца);

V_0 – длина дуги для свободного пробега здания во время его качения – расчётная длина.

Таким образом, мы различаем **расчётную длину дуги V_0 ; конструктивную длину дуги $2V_k$; полную конструктивную длину дуги V_{II}** . [17]).

Основные графики, по которым можно судить о колебательном процессе здания (во время землетрясения), обозначены буквой $P_{\min}$ – вероятность (минимальная) нахождения перемещений в пределах уровня $|V_0|$:

$$P_{\min} \{ -V_0 \leq y \leq V_0 \}.$$

Эти графики даны в зависимости от параметра V_0 (пояснение V_0 дано выше).

Под обозначением S_f даны нормированные спектральные плотности ускорения поверхности земли.

Анализируя множество проведенных численных экспериментов, можно сделать следующий вывод:

при конструировании кинематических опор рекомендуется принимать

$H = 300 \text{ см}$;

$V_0 = 12 \text{ см}$, $R_1 = 152 \text{ см}$ ($V_1 = V_{\text{см}} + V_0$);

$V_2 = 3 \text{ см}$, $R_2 = 200 \text{ см}$;

$V_3 = 2 \text{ см}$, $R_3 = 600 \text{ см}$;

V_4 – оставшийся участок, $R_4 = 800 \text{ см}$.

При этом вероятность «невыхода» перемещений здания за пределы первого участка кривизны КО равна примерно 0,997; при этом сейсмические силы ничтожно малы (рис.2 – первый участок слева и справа от нуля).

Здесь речь идёт не столько о перемещениях самого здания относительно поверхности земли, сколько о перемещениях поверхности земли относительно здания.

При сейсмических колебаниях здание, покоящееся на КО, с переменной кривизной поверхности качения, имеет ограниченные перемещения: переменность кривизны играет здесь роль упругих включающихся связей.

Ниже перечислим основные выводы по статье:

1. В настоящей статье изложена методика расчета сейсмостойкого здания на кинематических опорах, с использованием данных реальных сильных землетрясений.
2. По результатам численных экспериментов, проведенных на компьютере, построены графики надежности сейсмостойкости здания при землетрясениях.
3. Построенный алгоритм и разработанная методика могут быть использованны при расчете и проектировании сейсмостойких зданий, как на обычных опорах, так и на опорах кинематических [18-21].

Библиографический список:

1. Абакаров А.Д., Курбанов И.Б. К оценке сейсмического риска территории. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. №32, 2014 г. стр.68-77.
2. Айзенберг Я.М. Сооружения с выключающимися связями для сейсмических районов. Стройиздат, 1976. М. С 440.
3. Бабаков И.М. «Теория колебаний», М., «Наука», 1965.

4. Болотин В.В. Статистические методы в строительной механике. Издательство литературы по строительству. 1965. М. С 310.
5. Болотин В.В. Применение теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений. Издательство литературы по строительству, 1971. М. С 280.
6. Гнеденко Б.В. Курс теории вероятностей. Гостехиздат, 1961. М. С 526.
7. Гольденблат И.И., Николаенко Н.А., Поляков С.В. и др. Модели сейсмостойких сооружений. Наука, 1980. М. С 362.
8. Муселемов Х.М., Устарханов О.М., Юсупов А.К. Статистический анализ акселерограмм реальных сильных землетрясений. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки., № 4, 2017 г. Стр.170-184.
9. Патент на изобретение №2200810 «Адаптивная сейсмозащита зданий и сооружений». Приоритет 0,6,04, 2001; ФИПС г. Москва.
10. Патент на изобретение №2256749 «Кинематические опоры сейсмостойких зданий и сооружений». Приоритет 18.08.2003 ; ФИПС г. Москва
11. Поляков С.В., Килимник Л.Ш., Черкашин А.В., Современные методы сейсмозащиты зданий. М., Стройиздат, 1988.
12. Пугачев В.С. Теория случайных функций. Физматгиз, 1960. М. С 798.
13. Свешников А.А. Прикладные методы теории случайных функций. «Наука», М., 1968.
14. Сейсмоизоляция и адаптивные системы. «Наука», М., 1983, под редакцией Айзенберга Я.М.
15. Юсупов А.К. «Резонанс в стохастических системах». Журнал «Известия Северо-Кавказского научного центра» (серия естественных наук), г. Ростов-на-Дону, 1979, №1. С 43-48.
16. Юсупов А.К., Абакаров М.А. Численные эксперименты работы кинематических стен сейсмостойких зданий. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. №32, 2014 г. стр.60-67.
17. Юсупов А.К. Проектирование сейсмостойких зданий на кинематических опорах. Издательство «Лотос», Махачкала 2006 г.
18. Catalogue on lead rubber bearings series LRB. «FIP Industriale S.P.A» 26.
19. Conde, F.F. Seismic structures / F.F. Conde // International Symposium FIP, Tbilisi, 1972, p. 655-663. 27.
20. Hwang, J.S. (1996). An equivalent linear model of lead-rubber seismic isolation bearings / J.S. Hwang, L.M. Chiou // Journal of Engineering Structures. 1996, 18(7), 528-536.
21. Catalogue on lead rubber bearings series LRB. «FIP Industriale S.P.A».

References:

1. Abakarov A.D., Kurbanov I.B. K otsenke seysmicheskogo riska territorii. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences, №32, 2014 g. Str.68-77. [Abakarov A.D., Kurbanov I.B. To assess the seismic risk of the territory. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences, №32, 2014 p. 68-77. (In Russ)]
2. Ayzenberg Y.A.M. Sooruzheniya s vyklyuchayushchimisya svyazyami dlya seysmi-cheskikh rayonov. Stroyizdat, 1976. M. S 440. [Eisenberg Y.M. Structures with shutdown connections for seismic regions. Stroyizdat, 1976. M. C 440. (In Russ)]
3. Babakov I.M. «Teoriya kolebaniy», M., «Nauka», 1965. [Babakov I.M. "Theory of oscillations", M., "Science", 1965. (In Russ)]
4. Bolotin V.V. Statisticheskiye metody v stroitel'noy mekhanike. Izdatel'stvo literatury po stroitel'stvu. 1965. M. S 310. [Bolotin V.V. Statistical methods in structural mechanics. Publisher of literature on construction. 1965. M. C 310. (In Russ)]
5. Bolotin V.V. Primeneniye teorii veroyatnostey i teorii nadezhnosti v raschetakh sooruzheniy. Izdatel'stvo literatury po stroitel'stvu, 1971. M. S 280. [Bolotin V.V. The use of probability theory and reliability theory in the calculations of structures. Publishing house of literature on construction, 1971. M. C 280. (In Russ)]
6. Gnedenko B.V. Kurs teorii veroyatnostey. Gostekhizdat, 1961. M. S 526. [Gnedenko B.V. Course of probability theory. Gostekhizdat, 1961. M. C 526. (In Russ)]
7. Gol'denblat I.I., Nikolayenko N.A., Polyakov S.V. i dr. Modeli seysmostoykikh sooruzheniy. Nauka, 1980. M. S 362. [Goldenblat I.I., Nikolaenko N.A., Polyakov S.V. and other models of seismic structures. Science, 1980. M. C 362. (In Russ)]
8. Muselemov K.H.M., Ustarkhanov O.M., Yusupov A.K. Statisticheskiy analiz akselerogramm real'nykh sil'nykh zemlet-ryaseny. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. № 4, 2017. Str.170-184. [Muselemov Kh.M., Ustarkhanov OM, Yusupov AK Statistical analysis accelerograms of real strong earthquakes. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences., No. 4, 2017 pp. 170-184. (In Russ)]
9. Patent na izobreteniyе №2200810 «Adaptivnaya seysmozashchita zdaniy i sooruzheniy». Prioritet 0,6,04, 2001; FIPS g. Moskva. [Patent for invention No. 2200810 "Adaptive seismic protection of buildings and structures". Priority 0.6.04, 2001; FIPS Moscow. (In Russ)]
10. Patent na izobreteniyе №2256749 «Kinematicheskiye opory seysmostoykikh zdaniy i sooruzheniy». Prioritet 18.08.2003 ; FIPS g. Moskva [Patent for invention №2256749 "Kinematic supports of seismic resistant buildings and structures". Priority 08.18.2003; FIPS Moscow (In Russ)]
11. Polyakov S.V., Kilimnik L.Sh., Cherkashin A.V., Sovremennyye metody seysmozashchity zdaniy. M., Stroyizdat, 1988. [Polyakov, SV, Kilimnik, L.Sh., Cherkashin, AV, Modern Methods seismic protection of buildings. M., stroyizdat, 1988. (In Russ)]
12. Pugachev V.S. Teoriya sluchaynykh funktsiy. Fizmatgiz, 1960. M. S 798. [Pugachev V.S. Theory of random functions. Fizmatgiz, 1960. M. C 798. (In Russ)]

13. Sveshnikov A.A. Prikladnyye metody teorii sluchaynykh funktsiy. «Nauka», M., 1968. [Sveshnikov A.A. Applied methods of the theory of random functions. "Science", M., 1968. (In Russ)]
14. Seysmoizolyatsiya i adaptivnyye sistemy. «Nauka», M., 1983, pod redaktsiyey Ayzenberga YA.M. [Seismic isolation and adaptive systems. "Science", M., 1983, edited Eisenberg J.M. (In Russ)]
15. Yusupov A.K. «Rezonans v stokhasticheskikh sistemakh». Zhurnal «Izvestiya Severo-Kavkazskogo nauchnogo tsentra» (seriya yestestvennykh nauk), g. Rostov-na-Donu, 1979, №1. S 43-48. [Yusupov A.K. "Resonance in stochastic systems". The journal "News of the North Caucasian Scientific Center" (a series of natural sciences), Rostov-on-Don, 1979, №1. From 43-48. (In Russ)]
16. Yusupov A.K., Abakarov M.A. Chislennyye eksperimenty raboty kinematcheskikh sten seysmostoykikh zdaniy. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. Vol, №32, 2014 g. Str.60-67. [Yusupov A.K., Abakarov M.A. Numerical experiments of kinematic walls of seismic resistant buildings. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. Vol, №32, 2014. pp.60-67. (In Russ)]
17. Yusupov A.K. Proyektirovaniye seysmostoykikh zdaniy na kinematcheskikh oporakh. Izdatel'stvo «Lotos», Makhachkala 2006 g. [Yusupov A.K. Design of seismic resistant buildings on kinematic supports. Publishing House "Lotos", Makhachkala 2006. Design of earthquake-resistant buildings on kinematic supports. Publishing house "Lotus", Makhachkala 2006. (In Russ)]
18. Catalogue on lead rubber bearings series LRB. "FIP Industriale S. P. A" 26.
19. Conde, F. F. Seismic structures / F. Conde, F. // International Simposium veterinário FIP, Tbilisi, 1972, p. 655-663.
20. Hwang J. S. (1996). An equivalent linear model of lead-rubber seismic isolation bearings / J. S. Hwang, L. M. Chiou // Journal of Engineering Structures. 1996, 18 (7), 528-536.
21. Catalogue on lead rubber bearings series LRB. "FIP Industriale S. P. A".

Сведения об авторах:

Муселемов Хайрулла Магомедмуратович – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры строительных конструкций и гидротехнических сооружений.

Устарханов Осман Магомедович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой строительных конструкций и гидротехнических сооружений.

Юсупов Абусупьян Курашевич – доктор технических наук, профессор кафедры строительных конструкций и гидротехнических сооружений.

Information about the authors:

Khayrulla M. Muselemov – Cand. Sci. (Technical), Senior Lecturer, Department of Building Constructions and Hydraulic Structures.

Osman M. Ustarhanov – Dr. Sci. (Technical), Prof., Department of Building Constructions and Hydraulic Structures.

Abusupyan K. Yusupov – Dr. Sci. (Technical), Prof., Department of Building Constructions and Hydraulic Structures.

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 30.05.2018.

Принята в печать 16.08.2018.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 30.05.2018.

Accepted for publication 16.08.2018.

Для цитирования: Нахаев М.Р., Саламанова М.Ш., Узаева А.А. Влияние гранулометрии барханных песков на свойства ремонтных модифицированных составов. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2018;45 (3):212-220. DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-3-212-220

For citation: Nakhaev M.R., Salamanova M.Sh., Uzaeva A.A. The influence of granulometry of vella sands on the properties of repaired modified compositions. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2018; 45(3):212-220. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-3-212-220

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

УДК 691.32

DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-3-212-220

ВЛИЯНИЕ ГРАНУЛОМЕТРИИ БАРХАННЫХ ПЕСКОВ НА СВОЙСТВА РЕМОНТНЫХ МОДИФИЦИРОВАННЫХ СОСТАВОВ

Нахаев М.Р.², Саламанова М.Ш.², Узаева А.А.¹

¹Комплексный научно-исследовательский институт имени Х.И. Ибрагимова Российской академии наук,

г. Грозный, ул. Старопромысловское шоссе, 21, Россия,

²Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М.Д. Миллионщикова,

г. Грозный, ул. Х.А. Исаева, 100, Россия,

e-mail: aaenzaeva@mail.ru e-mail: madina_salamanova@mail.ru e-mail: nr-nakhaev@mail.ru

Аннотация. Цель. Исследование проблем, связанных с возможностью эффективного использования некондиционных барханных песков месторождения Шелковское в качестве минеральной добавки для получения тонкомолотых вяжущих и обогащения отсева дробления горных пород. **Метод.** Основываются на установленных положениях теории твердения ремонтных модифицированных составов с комплексным использованием виброактивированных минеральных и полимерных компонентов, и, в частности, наполненной системы "портландцемент – барханный песок – С-3", а также математической логики, и технологии композиционных материалов. Исследования проводились с учетом действующих государственных стандартов и рекомендаций. **Результат.** Представлены результаты исследования местных барханных песков и отсева дробления горных пород, для получения обогащенных заполнителей с оптимальной гранулометрией и свойствами. Получены ремонтные составы с использованием полиминеральных барханных песков, входящих в состав активированного вяжущего в качестве наполнителя, и являющихся одним из основных компонентов обогащенного заполнителя. **Вывод.** Установлено оптимальная рецептура обогащенного песка, с удалением 60 % фракции 2,5 – 1,25 мм от отсева дробления и добавление 40 % фракции 0,315 – 0,14 мм барханного песка, что существенно снижает пустотность заполнителя до 38,8 % и водопотребность заполнителя до 6,5 %, значительно улучшая свойства полученных с их использованием ремонтных составов. Доказано, что исследованные барханные пески с характерным минералогическим, химическим и гранулометрическим составом являются эффективным компонентом

Ключевые слова: гранулометрический состав, барханные пески, минеральные добавки, отсев дробления, обогащенный заполнитель, ремонтный состав, модуль крупности, виброактивация, суперпластификатор, обогащение песков, технологический прием

TECHNICAL SCIENCE
BUILDING AND ARCHITECTURE

THE INFLUENCE OF GRANULOMETRY OF VELLA SANDS ON THE PROPERTIES OF
REPAIRED MODIFIED COMPOSITIONS

Magomed R. Nakhaev³, Madina Sh. Salamanova², Aminat A. Uzaeva¹

¹Complex Research Institute Ibragimova of the Russian Academy of Sciences,
Staropromislovskoe highway, 21, Grozny, Russia,

²M.D.Millionshtchikov Grozny State Oil Technical University,
100 H.A. Isayev Str., Grozny, Russia,

e-mail: aaauzaeva@mail.ru e-mail: madina_salamanova@mail.ru e-mail: nr-nakhaev@mail.ru

Abstract. Objectives. Study of the problems associated with the possibility of the effective use of substandard sand dunes of the Shelkovskoye deposit as a mineral additive for the production of fine-ground binders and the enrichment of rock crushing screenings. **Method.** They are based on the established principles of the theory of hardening repair modified compositions with the integrated use of vibroactivated mineral and polymer components, and in particular, the filled system "Portland cement - sandstone - C-3", as well as mathematical logic and technology of composite materials. The studies were carried out taking into account current state standards and recommendations. **Result.** The results of the study of local sand dunes and rock crushing screenings are presented for obtaining enriched aggregates with optimal granulometry and properties. Repair compositions were obtained with the use of polymineral sand sand, which are part of the activated binder as a filler, and which are one of the main components of the enriched aggregate. **Conclusion.** The optimal formulation of enriched sand was established, with removal of 60% of the fraction 2.5 - 1.25 mm from the crushing screenings and the addition of 40% of the fraction of 0.315 - 0.14 mm of sand sand, which significantly reduces the void content of the aggregate to 38.8% and the water requirement of the aggregate to 6.5%, significantly improving the properties of the repair compositions obtained with their use. It has been proved that the studied sand dunes with a characteristic mineralogical, chemical and particle size distribution are an effective component

Keywords: granulometric composition, sand sands, mineral additives, crushing screenings, enriched aggregate, repair composition, fineness modulus, vibration activation, superplasticizer, sand enrichment, technological procedure

Введение. В Чеченской Республике встречаются участки типичных ландшафтов пустынь Средней Азии. Исторические моменты образования барханных песков начались с того, что Терско-Кумская низменность многократно заливалась водами Каспия и на ее поверхности наслаивались толщи морских осадков. Реки, впадающие в древний Каспийский бассейн, отлагали в своих устьях приносимый ими мелкий обломочный материал, создавали большие песчаные дельты [1,5,7]. Сейчас эти дельты сохранились на Терско-Кумской низменности в виде крупных песчаных массивов. Своим сильно всхолмленным рельефом они резко выделяются среди окружающей их равнины. К территории Чеченской Республики относится только южная часть Терско-Кумской низменности. Почти три четверти всей ее площади занимает Притерский песчаный массив. Его золотой рельеф сформировался под действием господствующих на низменности восточных ветров [5,14-17].

В настоящее время барханный песчаный массив раскинулся на территории республики более 50 млн. га и нужно отметить, что процессы опустынивания протекают во многих субъектах Российской Федерации. Возрастающие антропогенные нагрузки на природные экосистемы обуславливают разрушение, деградацию растительного покрова, формирование очагов опустынивания и, в конечном итоге, возникновение кризисных ситуаций [5,7,9-13].

В конце 60-х годов прошлого столетия площадь барханных песков составляла 1% от площади сельскохозяйственных угодий; в конце 70-х годов – 20 %, а в конце 80-х годов барханные пески занимали уже 50 – 60 %. Ежегодный прирост барханных песков составлял 60,0 тыс. га. Процесс опустынивания приобрел спонтанное развитие, ситуация стала оцениваться как экологическое бедствие. Предлагаются различные методы борьбы с опустыниванием: перераспределение земель между землепользователями, решение социально-экономических проблем сельских администраций с целью ликвидации очагов опустынивания на землях вокруг поселков, закрепление песков и комплексная фитомелиорация [4].

Постановка задачи. В данной работе предлагаются иные мероприятия для решения этой проблемы, это разработка ремонтных составов из мелкозернистых бетонов на основе барханных песков, это позволит в какой-то мере предотвратить опустынивание Терско-Кумской низменности.

Проектируемые рецептуры ремонтных составов из мелкозернистого бетона должны, в конечном счете, создать такую однородную среду, в которой будут плотно упаковываться частицы портландцемента, минеральной добавки из барханных песков, ПАВ и заполнителя. Вероятность получения качественной и долговечной композиции высокой прочности и плотности возможна только при корректном подборе всех компонентов бетонной смеси [2-4].

Так как в рецептуру ремонтного состава из мелкозернистого бетона входят только два компонента - вяжущее и заполнитель, и именно от качества песка, его минералогического, химического и гранулометрического состава будут зависеть реологические, технологические и прочностные параметры композита. Модуль крупности, размер и форма поверхности, межзерновая пустотность, водопотребность и другие важные свойства оказывают влияние на показатели бетонной смеси, цементного камня и, конечно же, мелкозернистого бетона [6,8].

Методы исследования. Гранулометрический состав барханных песков характеризуется преобладанием частиц размером менее 0,1 мм, модуль крупности их меньше единицы, что позволяет относить данные пески к разряду тонких песков.

Визуальный анализ с помощью бинокулярного микроскопа установил, что данные пески светлого, а местами серовато-желтоватого цвета.

Преимущественно они представлены зернами белого, прозрачного и замутненного кварца. Изучение частиц барханного песка методом сканирующей электронной микроскопии (рис.1), показало, наличие зерен неправильной формы с овальными, сглаженными контурами, в небольшом количестве присутствуют остроугольные обломки.

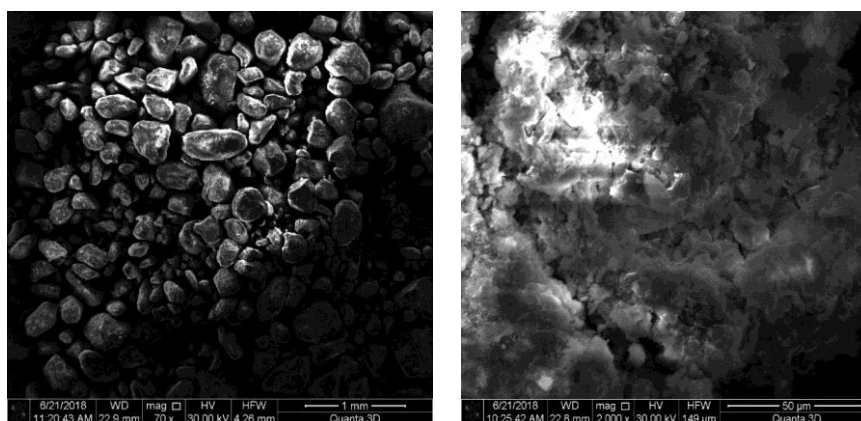


Рис.1. Микрофотография зерен барханного песка

Fig. 1. Micrograph of grains of sand sand

Авторами изучались: химический состав, основные физико-механические свойства и минералогический состав барханных песков, а в таблицах 1 – 3 приводятся результаты исследований.

Таблица 1. Химический состав барханных песков, %
Table 1. The chemical composition of sand dunes, %

MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	SO ₃	ппп
2,41	7,81	59,54	1,44	17,52	2,6	1,35	0,21	7,12

Таблица 2. Основные физико-механические характеристики барханных песков
Table 2. Main physical and mechanical characteristics of sand sands

Размер сит, мм	1,25	0,63	0,315	0,14	Остаток на дне сит
Частные остатки, %	3,5	2,7	3,1	31,7	59
Полные остатки, %	3,5	6,2	9,3	41,0	
Модуль крупности	0,6				
Содержание пылевидных и глинистых частиц, %	5,4				
Истинная плотность зерен, кг/м ³	2650				
Средняя насыпная плотность, кг/м ³	1390				
Пустотность песка, %	48				
Водопотребность, %	12				

Таблица 3. Минералогический состав барханных песков
Table 3. Mineralogical composition of sand dunes

Наименование минералов	Содержание удельных фракций, %						% основной массы песка
	0,5 – 0,25	0,25 – 0,1	0,1 – 0,05	0,05 – 0,01	0,01 – 0,005	Менее 0,005	
Кварц	60	52,7	45,7	45,7	40	31,3	48,0
Полевой шпат	5	12,6	11,7	11,9	10	30,6	10,5
Карбонаты	-	0,72	11,1	41,8	40	2,7	13,0
Слюда	-	-	-	6,08	10	37,4	2,5
Остальные	35	34,0	31,3	4,1	-	-	6

Исследованные барханные пески природного происхождения использовались для получения активированных тонкомолотых вяжущих в производстве ремонтных составов с улучшенными эксплуатационными показателями. Рецептуры тонкомолотых вяжущих приведены в табл.4.

Таблица 4. Рецептуры тонкомолотых вяжущих
Table 4. Recipes for ground milling binders

№ состава	Способ активации	Условное обозначение	Содержание компонентов тонкомолотого вяжущего, %		
			ПЦ	Барханный песок	С-3
1	Совместная вибро-активация ВМ-20	ПЦ	100	-	-
2		TMB-85	84	15	1,0
3		TMB-75	74	25	1,0
4		TMB-65	64	35	1,0

Обсуждение результатов. Барханные пески относятся к классу тонких с модулем крупности $M_k = 0,6$, водопотребность их довольно высокая 12 %, межзерновая пустотность так же

имеет высокий показатель 48 %, поэтому для получения прочных и долговечных мелкозернистых бетонов необходимо обогащать данные пески высевками от дробления горных пород, которые относятся к категории очень крупных песков с модулем крупности 3,58. На рис. 2 мы наблюдаем, что ни одна из кривых просеивания не проходит в рекомендуемой зоне, барханные пески, находятся в зоне мелких песков, а отсеы дробления в зоне крупных песков.

Поэтому для того чтобы получать качественные композиции, необходимо укрупнять зерновой состав барханных песков, используя такие технологические мероприятия, как фракционирование барханных песков и отсеов дробления, изъятие более крупных фракций, добавление более мелких фракций и обогащение недостающими фракциями.

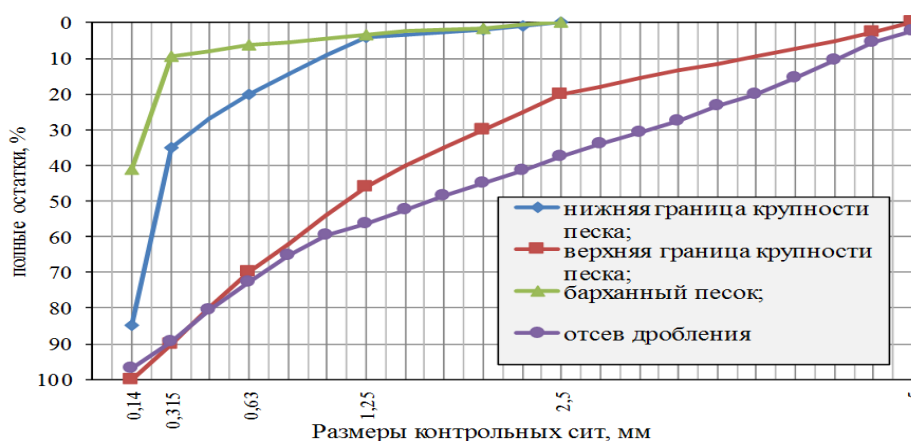


Рис. 2. График кривых просеивания исследуемых песков
Fig. 2. Graph of sifting curves of the studied sands

Использованные технологические мероприятия (табл.5) дали возможность расположить или приблизить кривые просеивания полученных смешанных песков к рекомендуемой зоне оптимального гранулометрического состава, а также снизить водопотребность и межзерновую пустотность.

Таблица 5. Технологические приемы обогащения песков
Table 5. Sand Recycling Techniques

Шифр обогащенного песка	Соотношение отсева дробления: барханный песок	Количество изъятых фракций отсева дробления 5 – 2,5 мм, %	Количество изъятых фракций отсева дробления 1,25 – 0,63 мм, %	Количество добавленной фракции отсева дробления 0,63 – 0,315 мм, %	Количество добавленной фракции барханного песка 0,14 – 0,315 мм, %
1	40/60	50	10	-	60
2	60/40	60	-	20	40
3	30/70	70	-	-	70
3	50/50	40	10	-	50
5	80/20	-	80	60	20

Фракционированием отсеов дробления Аргунского месторождения и тонких барханных песков мы получили различные композиции обогащенных песков, результаты определения зернового состава представлены в табл. 6 и на рис. 3.

Результаты получения оптимального зернового состава мелкого заполнителя показали, что технологические приемы, применённые в рецептурах обогащенных песков №1 и №2 являются наиболее эффективными, так как наблюдается снижение пустотности, водопотребности, что в дальнейшем положительно отразится на свойствах ремонтных модифицированных составов из мелкозернистого бетона.

Таблица 6. Гранулометрический состав обогащенных песков
Table 6. Granulometric composition of enriched sands

Шифр песка	Полные остатки (%) на ситах, мм						Модуль крупности	Насыпная плотность, кг/м³	Пустотность, %	Водопоглощение, %
	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,14				
1	2,2	20,8	35,3	53	65,9	96,8	2,70	1500	41,5	6,9
2	2,2	18,6	38,1	59,8	75,9	96,8	2,91	1510	38,8	6,5
3	2,2	11,4	30,9	52,6	68,7	96,8	2,60	1460	42,7	7,4
4	-	22,2	34,5	49	65,1	96,8	2,67	1470	43,1	7,0
5	2,2	41,4	60,9	67,1	83,2	96,8	44,2	5,9		

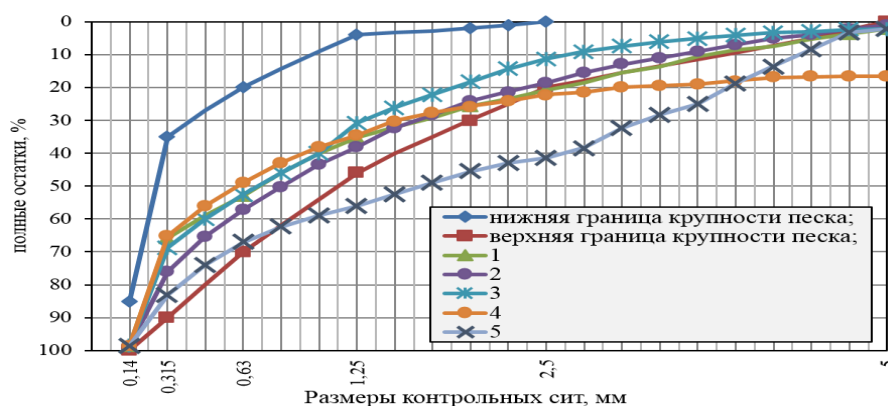


Рис.3. График кривых просеивания обогащенных песков
Fig.3. Sifting curves of enriched sands

Для подтверждения выдвинутой гипотезы и оценки влияния гранулометрического состава заполнителя на свойства ремонтных модифицированных составов с применением виброактивированного тонкомолотого вяжущего на основе барханных песков. Для получения составов была приготовлена формовочная смесь с использованием ТМВ-75 виброактивированного в течение 10 минут и обогащенных песков (рецептура 6), подвижность смеси П2, так как в состав тонкомолотого вяжущего входит ПАВ, а водопоглощение уменьшилось. Были изготовлены образцы кубы размером 10х10х10 см, которые твердели в камере выдерживания при температуре 20 ± 2 °C и влажности 95 %.

Изучалась кинетика набора прочности на 3, 7 и 28 сутки твердения, результаты испытаний приведены в табл. 7 и на рис. 4.

Таблица 7. Влияние зернового состава песка на свойства ремонтных модифицированных составов на основе ТМВ-75

Table 7. The effect of the sand grain composition on the properties of the modified TMB-75 based compositions

Шифр песка	Расход материалов, кг/м³			В/Ц	Средняя плотность, кг/м³	Предел прочности при сжатии, Мпа в возрасте			водопоглощение, %
	ТМВ-75	П	В			3	7	28	
1	535	1520	182	0,34	2237	13,8	44,2	57,8	7,8
2	530	1530	164	0,31	2224	14,2	47,1	63,2	6,7
3	545	1510	180	0,33	2235	13,3	41,3	54,6	7,6
4	540	1510	184	0,34	2234	12,8	38,4	52,9	8,2
5	525	1530	173	0,33	2228	12,6	37,8	51,7	9,4

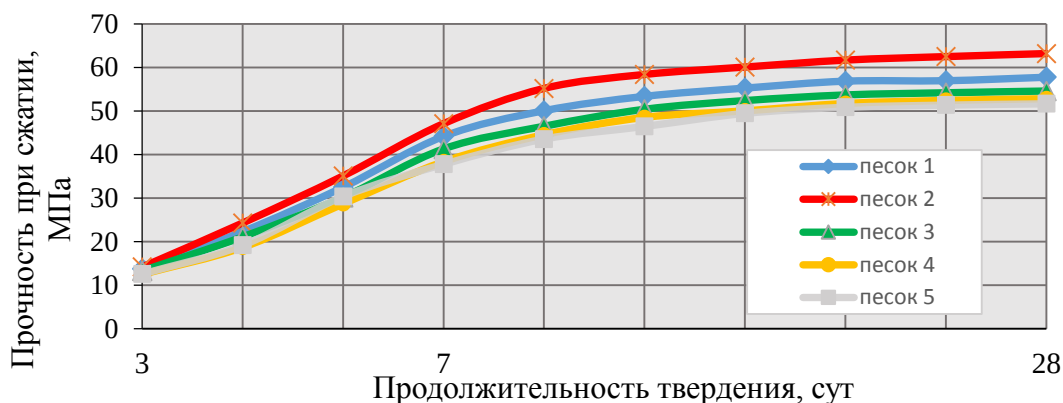


Рис.4 Зависимость прочности от гранулометрического состава песка
Fig.4. Dependence of strength on the granulometric composition of sand

Результаты испытаний ремонтных модифицированных составов из мелкозернистого бетона показали, что использование тонкомолотого вяжущего ТМВ -75 благоприятно сказалось на прочностных характеристиках композитов с применением обогащенных песков всех 5 составов.

Можно отметить, что использование многокомпонентного вяжущего, в составе которого суперпластификатор С-3, находится в комплексе с портландцементом и минеральной добавкой барханного песка, заметно снижает водопотребность бетонной смеси. Так же отмечается, что при фракционировании заполнителя можно добиться наименьших показателей межзерновой пустотности, что положительно сказывается на свойствах ремонтного бетона, при этом соотношение заполнителей отсева дробления к барханному песку 60/40 % является наиболее выгодным, что подтверждается результатами испытаний приведенных на рис. 5.

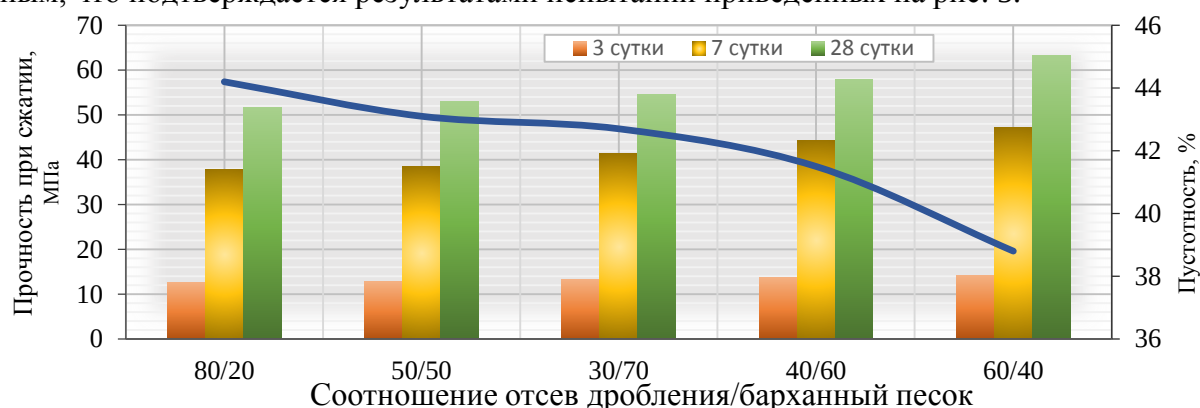


Рис.5. Диаграммы зависимости прочности бетона и пустотности от соотношения фракций заполнителя

Fig.5. Diagrams of dependence of concrete strength and hollowness on the ratio of aggregate fractions

Оптимальной рецептурой обогащенного песка можно считать состав №2, в которой удаление 60 % фракции 2,5 – 1,25 мм отсева дробления и добавление 40 % фракции 0,315 – 0,14 мм барханного песка, существенно снижает пустотность заполнителя до 38,8 % и водопотребность до 6,5 %, значительно улучшая свойства полученного с их использованием ремонтных модифицированных составов.

Вывод. Установлено влияние вида и гранулометрического состава фракционированного мелкого заполнителя, полученного смешиванием в нужном соотношении отсева дробления Аргунского месторождения и барханных песков Шелковского месторождения на свойства ремонтных составов из мелкозернистого бетона. Оптимальной рецептурой обогащенного песка можно считать состав с удалением 60 % фракции 2,5 – 1,25 мм от отсева дробления и добавление 40 % фракции 0,315 – 0,14 мм барханного песка, что существенно снижает пустотность заполнителя до 38,8 % и водопотребность заполнителя до 6,5 %, значительно улучшая свойства полученных

с их использованием ремонтных составов. Таким образом, исследованные барханные пески с характерным минералогическим, химическим и гранулометрическим составом являются эффективным компонентом для разработки ремонтных модифицированных составов.

Библиографический список:

1. Бисултанов Р.Г., Муртазаев С.-А.Ю., Саламанова М.Ш. Цементы низкой водопотребности на основе активной минеральной добавки различного происхождения // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2016. №1(40). С.98-107.
2. Удодов С.А., Черных В.Ф., Черный Д.В. Применение пористого заполнителя в отделочных составах для ячеистого бетона // Сухие строительные смеси. 2008. № 3. С.70.
3. Nesvetaev G., Koryanova Y., Zhilnikova T On effect of superplasticizers and mineral additives on shrinkage of hardened cement paste and concrete // В сборнике: MATEC Web of Conferences 27. Сер. "27th R-S-P Seminar, Theoretical Foundation of Civil Engineering (27RSP), TFoCE 2018" 2018. С. 04018.
4. Афонина М.И., Матюхин А.А. Опыт использования фито конструкций на примере юга России // Экономика строительства и природопользования. 2017. № 4 (65). С. 5-8.
5. Murtazayev S.Y., Saidumov M.S., Salamanova M.Sh., Alaskhanov A.Kh. High-quality and high-strength concrete for cast-in-situ constructions of unique buildings and structures // 20. Internationale Baustofftagung, Tagungsbericht. 12-14 september 2018, Bauhaus-Universitdt Weimar. Band 1 und 2. – Weimar: 2018. -B.2. –SS.991-996.
6. Hillemeier B., Buchenau, G., Herr, R., Huttel, R., Klubendorf, St., Schubert, K.: Spezialbetone, Betonkalender, Ernst & Sohn, 2006. -№1. -С.534-549.
7. Саламанова М.Ш., Сайдумов М.С., Муртазаева, Т.С.-А., Хубаев М. С.-М. Высококачественные модифицированные бетоны на основе минеральных добавок и суперпластификаторов различной природы// Научно-аналитический журнал «Инновации и инвестиции». 2015. №8, С. 159-163.
8. Pazhani K., Jeyaraj R. Study on durability of high performance concrete with industrial wastes // ATI - Applied Technologies & Innovations. Department of Civil Engineering, Anna University Chennai. India. – 2010. - Vol. 2. - № 8. - P.19-28.
9. Jeknavorian A., Roberts L., Jardine L. Et al. Condensed Polyacrylic Acid-Aminated Polyether Polymers as Superplasticizers for concrete. Proceedings Fifth CANMET//ACI Int. Conference. Rome, Italy, 1997, SP 173-4.
10. Ohta A., Sugiyama T., Tanaka Y. Fluidizing Mechanism and application of Polycarboxylate-Based Superplasticizers. Proceedings Fifth CANMET//ACI Int. Conference. Rome, Italy, 1997, SP 173-19.
11. Dosho Y. Development of a Sustainable Concrete Waste Recycling System «Application of Recycled Aggregate Concrete Produced by Aggregate Replacing Method» // Journal of Advanced Concrete Technology. Japan Concrete Institute. Scientific paper. – 2007. - Vol. 5. - №1. - P.27-42.
12. Yanagibashi K., Yonezawa T., Iwashimizu T. [etc.] A new recycling process for coarse aggregate to be used concrete structure. // Environment-Conscious Materials and Systems for Sustainable Development. Proceedings of RILEM International Symposium. Tokyo. - 2004. - P.137-143.
13. Bondarenko D.O., Bondarenko N.I., Bessmertnyi V.S. [etc.] Plasma-chemical modification of concrete, Advances in Engineering Research (AER). – 2018. – Vol. 157. – P. 105–110.
14. Strokova V.V., Sokolova Y.V., Ayzenshtadt A.M. [etc.] Energy characteristics of finely dispersed rock systems, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – Vol. 365. – Article number 032036.
15. Erofeev V. T., Bogatov A. D., Bogatova S. N. [etc.] Bioresistant building composites on the basis of glass wastes, Biosciences Biotechnology Research Asia. 2015. №1. T.12. pp. 661–669.
16. Stelmakh S.A., Nazhnev M.P., Shcherban E.M., Yanovskaya A.V., Cherpakov A.V. Selection of the composition for centrifuged concrete, types of centrifuges and compaction modes of concrete mixtures // Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications (PHENMA 2018) Abstracts & Schedule. Edited by Yun-Hae Kim, I.A. Parinov, S.-H. Chang. 2018. С. 337.
17. Shuisky A., Stelmakh S., Shcherban E., Torlina E. Recipe-technological aspects of improving the properties of non-autoclaved aerated concrete // MATEC Web of Conferences Сер. "International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment, ICMTME 2017" 2017. С. 05011.

References:

1. Bisultanov R.G., Murtazayev S.-A.YU., Salamanova M.SH. Tsementy nizkoy vodopotrebnosti na osnove aktivnoy mineral'noy dobavki razlichnogo proiskhozhdeniya // Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskkiye nauki. 2016. №1(40). S.98-107. [Bisultanov R.G., Murtazaev S.A.Yu., Salamanova M.Sh. Cements of low water demand on the basis of an active mineral additive of various origin // Herald of the Daghestan State Technical University. Technical science. 2016. №1 (40). pp.98-107. (In Russ)]
2. Udodov S.A., Chernykh V.F., Chernyy D.V. Primeneniye poristogo zapolnitelya v otdelochnykh sostavakh dlya yacheistogo betona // Sukhiye stroitel'nyye smesi. – 2008. – № 3. – S.70. [Udodov SA, Chernykh VF, Cherny DV Application of porous aggregate in finishing compositions for cellular concrete // Dry mixes. 2008. № 3. С.70. (In Russ)]
3. Nesvetaev G., Koryanova Y., Zhilnikova T On the effect of cement and concrete and concrete // In collection: MATEC Web of Conferences 27. Ser. "27th R-S-P Seminar, Theoretical Foundation of Civil Engineering (27RSP), TFoCE 2018" 2018. p. 04018.

4. Afonina M.I., Matyukhin A.A. Opyt ispol'zovaniya fitokonstruktsiy na primere yuga Ros-sii // *Ekonomika stroitel'stva i prirodopol'zovaniya*. 2017. № 4 (65). S. 5-8. [Afonina M.I., Matyukhin A.A. Experience of using phytoconstructions on the example of the south of Russia // *Economy of construction and nature management*. 2017. No. 4 (65). pp. 5-8. (In Russ)]
5. Murtazayev S.Y., Saidumov M.S., Salamanova M.Sh, Alaskhanov A.Kh. High-quality and high-level concrete for cast-in-situ constructions of unique buildings and structures // 20. Internationale Baustofftagung, Tagungsbericht. 12-14 september 2018, Bauhaus-Universität Weimar. Band 1 und 2. - Weimar: 2018. -B.2. –SS.991-996.
6. Hillemeier B., Buchenau, G., Herr, R., Huttel, R., Klubendorf, St., Schubert, K. : *Spezialbetone, Betonkalender*, Ernst & Sohn, 2006. -№1. -C.534-549.
7. Salamanova M.SH., Saydumov M.S., Murtazayeva, T.S-A., Khubayev M. S-M. Vysokokachestven-nyye modifitsirovannyye betony na osnove mineral'nykh dobavok i superplastifikatorov razlichnoy prirody// *Nauchno-analiticheskiy zhurnal «Innovatsii i investitsii»*.– 2015.– №8, S. 159-163. [Salamanova M.Sh., Saidumov MS, Murtazaeva, T.S.-A., Khubayev M.S.M. High-quality modified concretes based on mineral additives and superplasticizers of various nature // *Scientific and analytical journal "Innovations and Investments"*. 2015. №8, pp. 159-163. (In Russ)]
8. Pazhani K., Jeyaraj R. Study on durability of high performance concrete with industrial wastes // *ATI - Applied Technologies & Innovations. Department of Civil Engineering, Anna University Chennai. India - 2010. - Vol. 2. - № 8. - R.19-28.*
9. Jeknavorian A., Roberts L., Jardine L. Et al. Condensed Polyacrylic Acid-Aced Polyether Pol-ymers as Superplasticizers for concrete. *Proceedings Fifth CANMET // ACI Int. Conference. Rome, Italy, 1997, SP 173-4.*
10. Ohta A., Sugiyama T., Tanaka Y. Fluidizing Mechanism and the application of Polycarboxylate-Based Superplasticizers. *Proceedings Fifth CANMET // ACI Int. Conference. Rome, Italy, 1997, SP 173-19.*
11. Dosho Y. Development of a Sustainable Concrete Waste Recycling System. “Application of Recycled Aggregate Concrete Produced by Aggregate Replacing Method” // *Journal of Advanced Concrete Technology. Ja-pan Concrete Institute. Scientific paper. - 2007. - Vol. 5. - №1. - P.27-42.*
12. Yanagibashi, K., Yonezawa, T., Iwashimizu, T. [etc.] A new recycling process. // *Environment-Conscious Materials and Systems for Sustainable Development. Proceed-ings of RILEM International Symposium. Tokyo. - 2004. - P.137-143.*
13. Bondarenko D.O., Bondarenko N.I., Bessmertnyi V.S. [etc.] Plasma-chemical modification of concrete, *Advances in Engineering Research (AER)*. - 2018. - Vol. 157. - P. 105–110.
14. Strokova V.V., Sokolova Y.V., Ayzenshtadt A.M. [etc.] Energy features of dispersed rock systems, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. - 2018. - Vol. 365. - Article number 032036.
15. Erofeev V. T., Bogatov A. D., Bogatova S. N. [etc.] Bioresistant building composites, *Biosciences Biotechnology Research Asia*. - 2015. - №1. - T.12. pp. 661–669.
17. Stelmakh S.A., Nazhnev M.P., Shcherban E.M., Yanovskaya A.V., Cherpakov A.V. Selection of the composition of the concrete and mixtures of concrete mixtures | Edited by Yun-Hae Kim, I.A. Parinov, S.-H. Chang. 2018. p. 337.
18. Shuisky A., Stelmakh S., Shcherban E., Torlina E. Recipe-technological aspects of the non-autoclaved aerated concrete // *MATEC Web of Conferences Ser. "International Conference on Mod-Tren Trends in Manufacturing Technologies and Equipment, ICMTMTE 2017"* 2017. P. 05011.

Сведения об авторах:

Нахаев Магомед Рамзанович – кандидат технических наук, доцент, кафедра технологии строительного производства.

Саламанова Мадина Шахидовна – кандидат технических наук, доцент, кафедра технологии строительного производства.

Узаева Аминат Альвиевна – аспирант, кафедры технологии строительного производства.

Information about the authors:

Magomed R. Nakhaev – Cand. Sci. (Technical), Assoc. Prof., Department of Construction Technology.

Madina Sh. Salamanova – Cand. Sci. (Technical), Assoc. Prof., Department of Construction Technology.

Aminat A. Uzaeva – Graduate student, Department of Construction Technology.

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию 27.08.2018.

Received 27.08.2018.

Принята в печать 26.09.2018.

Accepted for publication 26.09.2018.

Для цитирования: Омаров А.О., Оцоков К.А. Влияние гранулометрии барханных песков на свойства ремонтных модифицированных составов. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2018;45 (3):221-230. DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-3-221-230

For citation: Omarov A.O., Otsokov K.A. Reduction of employment of formula working by using local fillers and waste of production. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2018; 45 (3):221-230. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-3-221-230

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

УДК 693.5+691.3

DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-3-221-230

СНИЖЕНИЕ ТРУДОЕМКОСТИ ОПАЛУБОЧНЫХ РАБОТ ПУТЕМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕСТНЫХ ЗАПОЛНИТЕЛЕЙ И ОТХОДОВ ПРОИЗВОДСТВА

Омаров А.О.², Оцоков К.А.¹

¹Национальный исследовательский

Московский государственный строительный университет,

¹129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, Россия,

²Дагестанский государственный технический университет,

²367026 г. Махачкала, пр. И. Шамиля 70, Россия,

¹e-mail: kamil24@mail.ru, ²e-mail: o.arif@mail.ru

Резюме. Целью настоящего исследования является изучение повышения оборачиваемости опалубки и снижение трудоемкости опалубочных работ для монолитного пенобетона регулированием его свойств за счет оптимального использования местных заполнителей Республики Дагестан и отходов производства. В частности, использовались при проведении экспериментальных работ цемент марки М500, кремнеземистый заполнитель - кварцевый песок месторождения в Кумторкалинском районе Республики Дагестан с низким модулем крупности, различные синтетические пенообразователи, перлитовый песок, молотый керамзитовый песок (г.Кизилюрт, РД), отсеб камнедробления (г.Кизилюрт). **Метод.** Использовался способ, при котором в пеногенераторе готовилась пена, затем готовился раствор из цемента, заполнителя и воды. Затем пена смешивалась с раствором в пенобетоносмесителе до набора соответствующей кратности. Кратность определялась, как отношение объема раствора пенобетонной смеси после перемешивания к объему раствора до перемешивания. При проведении исследований определялось водоцементное отношение при использовании трех видов заполнителя (керамзитовый песок, кварцевый песок месторождения в Кумторкалинском районе и перлитовый песок). **Результат.** Результаты исследований показали, что при увеличении водоцементного отношения при использовании трех видов заполнителя (керамзитовый песок, кварцевый песок месторождения в Кумторкалинском районе и перлитовый песок) возрастает показатель текучести пенобетонной смеси. **Вывод.** При одинаковых значениях водоцементного отношения смесь с заполнителем из перлитового песка имеет наименьшую текучесть, которая в свою очередь оказывает влияние на дальнейшее структурообразование пенобетона и позволяет подбирать оптимальный состав с заданными свойствами. Доказана возможность повышения оборачиваемости опалубки и снижение трудоемкости опалубочных работ для монолитного пенобетона регулированием его свойств за счет оптимального использования местных заполнителей и отходов производства.

Ключевые слова: водоцементное отношение, показатель текучести, пенобетонная смесь, трудоемкость, опалубочные работы, кратность, перлитовый песок, молотый керамзитовый песок

TECHNICAL SCIENCE
BUILDING AND ARCHITECTURE
REDUCTION OF EMPLOYMENT OF FORMWORK BY USING LOCAL FILLERS AND WASTE OF PRODUCTION

Arif O.Omarov², Kamil A.Otsokov¹

¹National research Moscow State University of Civil Engineering,

¹26 Yaroslavskoe shosse, Moscow 1129337, Russia,

²Daghestan State Technical University,

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

¹e-mail: kamil24@mail.ru, ²e-mail: o.arif@mail.ru

Abstract Objectives. The purpose of this study is to study the increase in turnover of formwork and reduce the complexity of formwork for monolithic foam concrete by regulating its properties through the optimal use of local aggregates of the Republic of Daghestan and industrial waste. In particular, the experimental work used cement grade M500, silica filler - deposits of quartz sand in Kumtorkala district of the Republic of Daghestan with a low module of size, various synthetic foaming agents, perlite sand, ground expanded clay sand (Kizilyurt, Republic of Daghestan), stone crushing roar (Kizilyurt). **Method.** In the production of foam concrete, a method was used in which foam was prepared in the foam generator, then a solution of cement, filler and water was prepared. Then the foam is mixed with a solution in a foam mixer until a set of appropriate multiplicity. (Multiplicity in this case was defined as the ratio of the volume of the foam concrete mixing solution after mixing to the volume of the solution before mixing). During the study, the water-cement ratio was determined using three types of aggregates (expanded clay sand, quartz sand deposits Kumtorkala district and perlite sand). The turnover rate of the concrete mixture was determined using the Attard viscometer. **Result.** The results of studies have shown that with an increase in the water-cement ratio using three types of aggregates (expanded clay sand, quartz sand deposits Kumtorkala district and perlite sand) will increase the flow rate of the foam concrete mixture. **Conclusion.** At the same values of the water-cement ratio, the mixture with a filler of perlite sand has the lowest fluidity, which in turn affects the further structure formation of foam concrete and allows you to choose the optimal composition with the desired properties. The possibility of increasing the turnover of artwork and reducing the complexity of artwork work for monolithic foam concrete by regulating its properties due to the optimal use of local aggregates of the Republic of Daghestan and industrial waste.

Keywords: water-cement ratio, flow index, foam concrete mixture, complexity, formwork, multiplicity, perlite sand, ground expanded clay sand

Введение. В настоящее время повышение оборачиваемости опалубок и снижение трудоемкости опалубочных работ является одним из путей повышения эффективности монолитного строительства. В сегодняшних сложных экономических условиях, повышение требований к энергосбережению зданий приобретает особую актуальность. Кроме того, в связи с ростом цен на энергоносители и теплоносители возникает необходимость использования энергосберегающих технологий в производстве строительных материалов. Учитывая значительные энергозатраты для обогрева помещений, остро встает вопрос о применении в качестве ограждающих конструкций эффективных теплоизоляционных и относительно дешевых строительных материалов.

Одним из таких материалов является неавтоклавный пенобетон [1]. Ограждающие конструкции из неавтоклавного пенобетона обладают высокими показателями теплоизоляции [2]. С учетом современных нормативных требований к ограждающим конструкциям зданий, применение традиционных распространенных стеновых материалов в некоторых случаях становится менее эффективно для создания эффективной теплоизоляции.

В этой связи интерес представляют пенобетоны, получаемые на различных видах вяжущих

щих и местных заполнителях Республики Дагестан, отходов производства различных предприятий. Использование данного материала при строительстве различных объектов приводит к снижению себестоимости, повышению уровня доступности жилья [2].

В настоящее время нашли широкое применение в качестве теплоизоляционных материалов минеральная вата, полимерные пенопласты, в тоже время полимерные пенопласты имеют недостаточную долговечность [7]. Керамзитовый заполнитель имеет насыпную плотностью более 500 кг/м^3 , а для получения эффективных стен, это значение не должно превышать $250\text{-}300 \text{ кг/м}^3$ [7]. Неавтоклавный пенобетон обладает хорошими теплофизическими свойствами, простой технологией производства и сравнительно низкими производственными затратами. К недостаткам можно отнести высокие усадочные деформации, что снижает прочность и морозостойкость, повышает теплопроводность и водопоглощение [7].

Пенобетон является материалом, который возможно производить прямо на стройплощадке, что исключает необходимость транспортировки и снижает цену [25]. При этом сегодня остаются актуальными вопросы повышения эффективности и качества пенобетона. Одним из путей повышения эффективности и качества, снижения затрат при производстве является применение местного сырья и отходов производства предприятий, а также изучение реологических характеристик [5]. Пенобетоны по некоторым свойствам превосходят распространенные в республике материалы аналогичного назначения [9].

Низкая плотность и легкость пенобетона позволяет сократить время транспортировки. Использование наименее энергозатратной безавтоклавной технологии позволяет производить пенобетон как в стационарных условиях, так и непосредственно на строительной площадке, что позволяет исключить затраты на бой, разгрузку-погрузку и транспортировку [26]. Диапазон использования монолитного пенобетона обширен, что делает его прекрасным материалом для строительства зданий и сооружений, где необходима быстрая скорость возведения [26,27].

В частности, монолитный пенобетон применим для утепления наружных стен [26]. В связи с повышением требований к термическому сопротивлению ограждающих конструкций требуемая толщина стен, строящихся и реконструируемых из легких бетонов на традиционных заполнителях увеличена [28]. В связи с этим в настоящее время особая роль отводится пенобетону как эффективному материалу для ограждающих конструкций. Именно поэтому, изготовление различных монолитных конструкций из пенобетона сегодня становится актуальным.

Постановка задачи. Увеличению спроса на эффективные теплоизоляционные строительные материалы также способствует и повышение требуемого сопротивления теплопередачи ограждающих конструкций [2].

В последнее время в Республике Дагестан наблюдается рост объемов монолитного строительства, что требует расширение производства строительных материалов. В этой связи интерес представляет производство пенобетона, что объясняется его высокими технико-экономическими характеристиками и наличием недефицитной сырьевой базы [2]. Преимуществами являются: быстрая скорость монтажа конструкций, легкость обработки, экологичность, высокие теплоизоляционные и звукоизоляционные свойства.

Неавтоклавный пенобетон отличается простотой, мобильностью производства, высокими эксплуатационными свойствами и соответствует современным требованиям, его использования, что позволяет обеспечить требуемое термическое сопротивление теплопередачи [29]. В этой связи актуальны вопросы получения эффективных пенобетонов с заданными эксплуатационными характеристиками и различные способы повышения эффективности пенобетона [18].

Следует учесть, что реологические свойства пенобетонов зависят от многих факторов в том числе, от однородности структуры, способа образования пор, вида вяжущих веществ и других компонентов, состава. Пористость пенобетонов характеризуется содержанием пор, их диаметрами равномерностью распределения [7]. Качество пенобетона повышается при использовании эффективных пенообразователей, стабилизаторов пены, структурообразующих компонентов [7]. Для создания пенобетона с оптимальными тепловлажностными характеристиками необходимо учитывать особенности формирования поровой структуры [8].

Особую актуальность представляет изучение особенностей взаимодействия пенообразователей с другими компонентами, используемыми при производстве неавтоклавного пенобетона, определение оптимальных концентраций пенообразователя при производстве [10]. В технологии получения эффективных пенобетонных смесей важную роль играет качество пенообразователя. Пенообразователь отвечает за образование ячеистой структуры бетона, а значит, во многом влияет на его свойства [6,11].

На свойства пенобетона влияет также прочность межпоровой перегородки. При повышении ее физико-механических свойств повышаются и прочностные характеристики пенобетона [12]. Также значимыми являются проблемы повышения качества пенобетонных смесей, изучение влияния свойств пены, режимов работы оборудования на свойства пенобетона, проблемы использования легких наполнителей [2].

Приобретают значимость сегодня исследования прочностных показателей [14], моделей прогнозирования прочности [14], совершенствования производства, изучение стойкости пенобетонных смесей против действия химических и физических агрессивных факторов [15], при применении различных вяжущих при производстве [13, 17], оценка влияния дисперсного армирования [16], учет структуры и строения межпоровых перегородок [19]. Реология пенобетонных смесей связана с их структурой, изменяющейся в процессе твердения. В этой связи оценка реологических свойств смесей необходима в технологическом процессе производства конструкций, особенно в процессе структурообразования. Водоцементное, водотвердое отношение, количество и качество заполнителей оказывает влияние на реологические характеристики пенобетонных смесей, что является важным при производстве.

Местные отходы производства могут применяться при изготовлении различных ограждающих конструкций из теплоизоляционного пенобетона, которые имеют сопоставимые функциональные свойства с плитами из минеральной ваты, а по некоторым строительно-эксплуатационным свойствам их превышают и имеют меньшую стоимость [23]. При организации технологического процесса изготовления пенобетонных изделий и получения высоких физико-механических показателей необходимо повысить усредненные данные, предусмотрев подготовку сырьевых компонентов. Подготовка сырьевых компонентов предполагает совместный помол вяжущего и кремнеземистого компонента [24]. При этом при производстве пенобетона могут применяться различные виды вяжущих, различные виды местного заполнителя. В технологии пенобетона важное значение имеет учет реологических характеристик, влияние водотвердого отношения на свойства [20].

При проектировании состава пенобетона одним из важных этапов является определение водотвердого, водоцементного отношения, которое влияет на различные свойства, долговечность и экономичность [22]. В частности, интерес представляют исследования по изучению повышения оборачиваемости опалубки и снижение трудоемкости опалубочных работ для монолитного пенобетона путем регулирования его свойств за счет оптимального использования местных заполнителей Республики Дагестан и отходов производства. Для изучения свойств были проведены исследования по изучению зависимости текучести пенобетонных смесей от водоцементного отношения (В/Ц) при использовании различных местных заполнителей Республики Дагестан и отходов производства и сравнение показателей текучести смесей [2]. При проведении экспериментальных работ использовались цемент марки М500, кремнеземистый заполнитель - кварцевый песок месторождения в Кумторкалинском районе с низким модулем крупности, различные синтетические пенообразователи, вспученный перлитовый песок (в том числе некондиционный, как отход производства), молотый керамзитовый песок (г.Кизилюрт), отсев камнедробления (г.Кизилюрт). Гранулометрические составы представлены в таблицах 1-3.

Таблица 1. Гранулометрический состав вспученного перлитового песка
Table 1. Granulometric composition of pearlite

№ сита	Масса остатков песка на данном сите в граммах	Частные остатки, в %	Полные остатки, в %
2.5	241	24.1	24.1
1.25	289	28.9	53.0
0.63	319	31.9	84.9
0.315	49	4.9	89.8
0.14	83	8.3	98.1
Прошло через сито N 0.14	19	1.9	100

Модуль крупности $M_{кр}=3.49$

Насыпная плотность 158 кг/м³

Таблица 2. Гранулометрический состав песка
Table 2. Granulometric composition of sand

№ сита	Масса остатков песка на данном сите в граммах	Частные остатки в %	Полные остатки в %
2.5	5	0.5	0.5
1.25	2	0.2	0.7
0.63	11	1.1	1.8
0.315	282	28.2	30
0.14	566	56.6	86.6
Прошло через сито N 0.14	134	13.4	100

Насыпная плотность -1116 кг/м³

Содержание глинистых частиц -2.5 %

Модуль крупности $M_{кр}=1.19$

Влажность 2.9 %

Таблица 3. Гранулометрический состав керамзитового песка
Table 3. Granulometric composition of ceramsite sand

№ сита	Масса остатков песка на данном сите в граммах	Частные остатки в %	Полные остатки в %
1.25	117	11.7	11.7
0.63	493	49.3	61
0.315	277	27.7	88.7
0.14	99	9.9	98.6
Прошло через сито N 0.14	14	1.4	100

Насыпная плотность -1108 кг/м³

Модуль крупности $M_{кр}=2,6$

Методы исследования. Изделия из неавтоклавного пенобетона сегодня нашли широкое применение в конструкциях гражданского и промышленного строительства. Невысокая плотность и высокие теплоизолирующие свойства этих материалов позволяют возводить облегченные ограждающие конструкции с требуемым термическим сопротивлением, а распространенные сырьевые компоненты, способствуют развитию производства. Однако для решения проблемы повышения качества продукции необходимо достижение высоких физико-механических показателей и долговечности изделий, необходим оптимальный подбор состава сырьевых компонентов [24].

Производство пенобетона осуществлялось следующим образом. В пеногенераторе готовилась пена, затем готовился раствор из цемента, кремнеземистого компонента (заполнителя) и воды. Затем пена смешивалась с раствором в пенобетоносмесителе до набора соответствующей

кратности. Кратность в данном случае определялась, как отношение объема раствора пенобетонной смеси после перемешивания к объему раствора до перемешивания. На заводе крупнопанельного домостроения МКД-3 (г.Кизилюрт) с участием авторов была внедрена модернизированная установка по получению пенобетона [2].

При проведении экспериментальных исследований определялось водоцементное отношение смеси при использовании трех видов заполнителя (керамзитовый песок, кварцевый песок месторождения в Кумторкалинском районе и перлит). Показатель текучести пенобетонной смеси определялся с помощью вискозиметра Суттарда. В технологии пенобетона важное значение имеет изучение реологических характеристик для наиболее оптимального подбора состава при изготовлении изделий.

Обсуждение результатов. Авторами были проведены исследования по изучению зависимости текучести пенобетонных смесей от водоцементного отношения при использовании различных местных заполнителей и отходов производства и сравнение показателей текучести смесей при одинаковых значениях водоцементного отношения [2,29] (рис.1-3). Для повышения эффективности технологии получения пенобетона неавтоклавного твердения изучалась зависимость текучести пенобетонных смесей от водоцементного отношения при использовании различных местных заполнителей и отходов производства, а также и влияние количества пены в цементной смеси на ее текучесть или влияние соотношения объема пены к объему цементного теста на текучесть пеномассы.

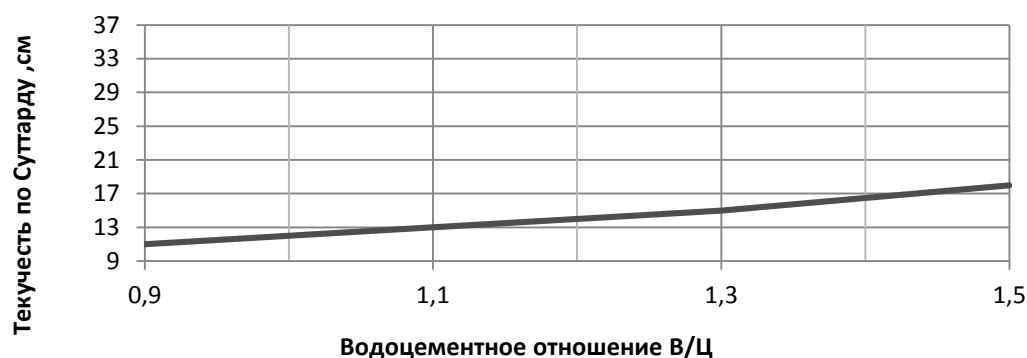


Рис. 1. Зависимость текучести пенобетонной смеси на основе перлита от водоцементного отношения

Fig. 1. The dependence of the fluidity of foamed concrete mixture based on perlite from water-to-cement ratio



Рис.2. Зависимость текучести пенобетонной смеси на основе молотого керамзитового песка от водоцементного отношения

Fig. 2. The dependence of the fluidity of foamed concrete mixture based on ground clay and sand from water-to-cement ratio

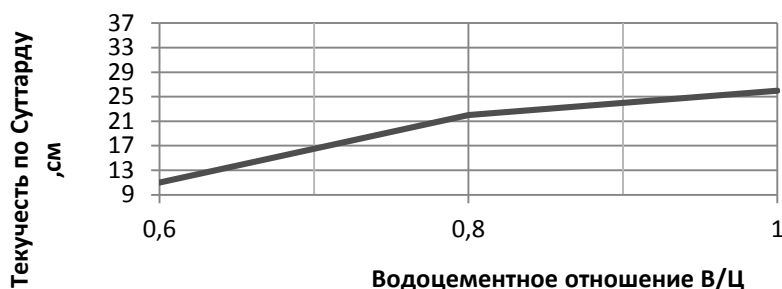


Рис.3. Зависимость текучести пеннобетонной смеси на основе кварцевого песка (месторождения в Кумторкалинском районе) от водоцементного отношения

Fig. 3. Dependence of the fluidity of foamed concrete mixture based on quartz sand (field Kumtorkala district) of the water-to-cement ratio

Результаты позволяют на основе анализа и экспериментальных данных подобрать оптимальный состав пеннобетона. Регулирование реологических характеристик позволяет улучшить характеристики пеннобетона, что может в дальнейшем использоваться при производстве изделий. В результате экспериментов были получены образцы пеннобетона.

Проведенные исследования показали, что формированием ячеистой структуры пеннобетона можно эффективно управлять с помощью направленного регулирования реологическими свойствами, за счет введения изменения характеристики, расхода пены и заполнителей. В результате разработаны и определены технологические параметры получения эффективных по теплофизическим параметрам экологически чистых неавтоклавных пеннобетонов. Разработана технология производства пеннобетона с использованием песков, искусственных и природных пористых заполнителей производимых в Республики Дагестан.

Исследования авторов показали, что повышение оборачиваемости опалубки и снижение трудоемкости опалубочных работ для монолитного пеннобетона можно добиться регулированием свойств пеннобетона путем подбора состава местных заполнителей и отходов производства (табл.4).

Таблица 4. Характеристики пеннобетона
Table 4. Characteristics of foam concrete

Цементное тесто с различными добавками для приготовления пеннобетона, в том числе с добавкой	Сроки начала схватывания, ч-мин		Трудоемкость монтажа опалубки (для монолитного пеннобетона) чел-час/м ²
	начало	конец	
Перлитовый песок	1-20	3-50	0,35
Молотый керамзитовый песок	1-35	4-10	0,56
Кварцевый песок (месторождение в Кумторкалинском районе)	1-40	4-20	0,56

Ускорение схватывания и структурообразования способствует предотвращению пеногашения и расслаивания пеннобетонной смеси при заливке [29]

Вывод. Исследования показали возможность повышения оборачиваемости опалубки и снижение трудоемкости опалубочных работ для монолитного пеннобетона путем регулированием его свойств за счет оптимального использования местных заполнителей Республики Дагестан и отходов производства.

При одинаковых значениях водоцементного отношения смесь с заполнителем из перлитового песка имеет наименьшую текучесть, которая оказывает влияние на дальнейшее структурообразование пеннобетона.

Библиографический список:

1. Оцоков К.А., Джалалов Ш.Г. Способы повышения эффективности пенобетона // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2016. № 3 .Т.42 .С.167-174.
2. Оцоков К.А. Влияние водоцементного отношения на реологические свойства пенобетона на местном сырье. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2017. Т. 44. № 4. С. 184-193.
3. Меркин А.П., Кобидзе Т.Е. Особенности структуры и особенности получения эффективных пенобетонных материалов // Строительные материалы. 1988. №3. с.12-14.
4. Селезнев И.Г. Пенобетон для монолитного домостроения: Дис...канд.техн.наук.- М.,1995.С.5
5. Тотурбиев А. Б. Теплоизоляционный пенобетон неавтоклавного твердения на бесцементном композиционном вяжущем : Автореф. дис. канд. техн. наук. — Ставрополь, 2006. С.3
6. Батраков В.Г. Модифицированные бетоны. Теория и практика. М., 1998. \С.394
7. Серова Р.Ф., Касумов А.Ш., Величко Е.Г. Проблемы производства и применения ячеистого бетона // Фундаментальные исследования. 2016. № 7-2. с. 267-271.
8. Павленко Н.В., Пастушков П.П., Хархардин А.Н., Войтович Е.В. Исследование взаимосвязи структурных и тепловлажностных характеристик на примере пенобетона на основе наноструктурированного вяжущего // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. 2016. № 6 (52). С. 80-86.
9. Лойко К.О., Белова С.А., Дерябин П.П. Влияние текучести смеси на основные свойства пенобетона сухой минерализации // В сборнике: Архитектура, строительство, транспорт материалы Международной научно-практической конференции. 2015. С. 518-522.
10. Горбач П.С., Щербин С.А. Влияние пенообразователя на свойства пены и пенобетона // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2014. № 5 (46). С. 126-132.
11. Кучерявенко Д.А. Свойства пенобетона неавтоклавного твердения с использованием белкового пенообразователя // В сборнике: Развитие дорожно-транспортного и строительного комплексов и освоение стратегически важных территорий Сибири и Арктики: вклад науки Материалы международной научно-практической конференции: электронный ресурс. 2014. С. 50-52.
12. Савенков А.И., Тюлькин С.В., Шиндель Е.В. Взаимосвязь вяжущего и свойств цементной матрицы и пенобетона // Аспирант. 2016. № 5 (21). С. 146-151.
13. New type of super-lightweight magnesium phosphate cement foamed concrete Yue L., Bing C. Journal of Materials in Civil Engineering. 2015. Т. 27. № 1. P. 04014112.
14. Models for prediction the strength and stiffness of foamed concrete at ambient temperature. Mydin Md.A.O. European researcher. series a. 2014. № 1-2 (67). p. 124-129.
15. Influence of size factor on creep deformation of fine-grain foam concrete for repair .Bataev D.K.S., Mazhiev Kh.N., Gaziev M.A., Salgiriev R.R., Mazhiev K.Kh., Mazhieva A.Kh. Life science journal. 2014. т. 11. № 12s. p. 995-997.
16. Disperse reinforcing role in producing non-autoclaved cellular foam concrete Vesova L.M. Procedia Engineering. 2016. т. 150. pp. 1587-1590.
17. Формирование структуры магнезиальных ячеистых бетонов Мирюк О.А. International scientific and practical conference world science. 2016. т. 1. № 3 (7). p. 62-66.
18. Improving technology of non-autoclave foam concrete. Krasinikova N.M., Khozin V.G., Morozov N.M., Borovskikh I.V., Eruslanova E.V. International Journal of Applied Engineering Research. 2014. Т. 9. № 22. P. 16735-16741.
19. Соков В.Н., Жабин Д.В., Бегларов А.Э., Землянушов Д.Ю. Теоретические основы получения ячеистых бетонов из пеномасс, активируемых гидротеплосиловым полем // Промышленное и гражданское строительство. 2012. № 12. С. 18-19.
20. Лойко К.О., Белова С.А., Дерябин П.П. Влияние текучести смеси на основные свойства пенобетона сухой минерализации. В сборнике: Архитектура, строительство, транспорт. Материалы Международной научно-практической конференции. 2015. С. 518-522.
21. Models for prediction the strength and stiffness of foamed concrete at ambient temperature mydin md.a.o.european researcher. series a. 2014. № 1-2 (67). с. 124-129.
22. Савенков А.И. Определение оптимального водотвердого отношения для пенобетона. Сборник научных трудов Ангарского государственного технического университета. 2005. т. 1. № 1. с. 372-374.
23. Коломацкий А.С., Коломацкий С.А. Теплоизоляционные изделия из пенобетона // Строительные материалы. 2003. №1. С.38-39.
24. Липилин А.Б., Коренюгина Н.В. Дезинтегратор мокрого помола в производстве неавтоклавного пенобетона // Строительные материалы. 2014. №6. С.10-11.
25. Бронзова М.К., Ватин Н.И., Гарифуллин М.Р. Конструкция каркасных зданий с применением монолитного пенобетона. Строительство уникальных зданий и сооружений. 2015. № 1 (28). С. 74-90.
26. Вытчиков Ю.С., Сапарёв М.Е., Голиков В.А. Применение монолитного пенобетона в ограждающих конструкциях зданий и сооружений с переменным тепловым режимом. Градостроительство и архитектура. 2018. Т. 8. № 4 (33). С. 10-14.

27. Гайдуков А.А. Целесообразность применения пенобетона в России // Аллея науки. 2017. Т. 4, № 10. С. 438–446.
28. Булавин В.А. Газобетон для монолитных ограждающих конструкций с вариатропной поровой структурой. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Ростовский государственный строительный университет. Ростов-на-Дону, 2004
29. Аниканова Т.В. Теплоизоляционные пенобетоны с ускоренным схватыванием: Автореф...дис.канд.техн.наук . Белгород: БГТУ, 2007. 21 с.

References:

1. Otsokov K.A., Dzhahalov S.H.G. Sposoby povysheniya effektivnosti penobetona//Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskkiye nauki. 2016. № 3 .Т.42 .S.167-174. [Otsokov K. A.,Jalalov S.G. Ways of increase of efficiency of foam concrete// Bulletin of the Dagestan state technical University. Technical Sciences.- 2016 no. 3 .Т.42 . pp.167-174. (In Russ)]
2. Otsokov K.A. Vliyaniye vodotsementnogo otnosheniya na reologicheskiye svoystva penobetona na mest-nom syr'ye. Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskkiye nauki. 2017. Т. 44. № 4. S. 184-193. [Otsokov K. A.Improving the efficiency of foam concrete by using local materials :the Dissertation ...kand.tech.sciences. M.,2002. P.141. (In Russ)]
3. Merkin A.P., Kobidze T.Ye. Osobennosti struktury i osobennosti polucheniya effektivnykh penobetonnykh materialov// Stroitel'nyye materialy. 1988. №3. c.12-14. [Merkin A. P., Kobidze T.E. Features of the structure and features of producing effective foam concrete materials// Building materials 1988. No. 3. pp. 12-14. (In Russ)]
4. Seleznev I.G.Penobeton dlya monolitnogo domostroyeniya: Dis...kand.tekhn.nauk.- M.,1995.S.5 [Seleznev I. G. Foam concrete for monolithic construction: Dis...Cand.tech.Sciences. M.,1995.P.5 (In Russ)]
5. Toturbiyev A. B. Teploizolyatsionnyy penobeton neavtoklavnogo tverdeniya na bestsementnom kompo-zitsion-nom vyazhushchem : Avtoref. dis. kand. tekhn. nauk. Stavropol', 2006. S.3 [Toturbiev A. B. Insulating foam concrete of non-autoclave hardening on cementless composite binder : author. dis. Cand. tech. Sciences. Stavropol, 2006. p. 3. (In Russ)]
6. Batrakov V.G.Modifitsirovannyye betony.Teoriya i praktika.-M.,1998.-S.394 [Batrakov V.G Modified concretes.Theory and practice. M.,1998. P. 394. (In Russ)]
7. Serova R.F., Kasumov A.S.H., Velichko Ye.G. Problemy proizvodstva i primeneniya yacheistogo betona //Fundamental'nyye issledovaniya. 2016. № 7-2. s. 267-271. [Serova R. F., Kasumov A. S., Velichko E. G. Problems of production and application of aerated concrete //Fundamental research. 2016. No. 7-2. pp. 267-271. (In Russ)]
8. Pavlenko N.V., Pastushkov P.P., Kharkhardin A.N., Voytovich Ye.V . Issledovaniye vzaimosvyazi strukturnykh i teplovlazhnostnykh kharakteristik na primere penobetona na osnove nanostrukturirovannogo vyazhushchego//Vestnik Sibirskoy gosudarstvennoy avtomobil'no-dorozhnoy akademii. 2016. № 6 (52). S. 80-86. [Pavlenko N. V. Pastushkov P. P., Kharkhardin A. N., Voitovich E.V . A study of the relationship of heat and humidity and structural characteristics on the example of foam concrete based on nanostructured binder//Bulletin of Siberian state automobile and highway Academy. 2016. No. 6 (52). pp. 80-86. (In Russ)]
9. Loyko K.O., Belova S.A.,Deryabin P.P. Vliyaniye tekuchesti smesi na osnovnyye svoystva penobetona sukhoy mineralizatsii// V sbornike: Arkhitektura, stroitel'stvo, transport materialy Mezhduna-rodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. 2015. S. 518-522. [Loyko O. K., Belov S. A.,Deryabin P. P. The Influence of fluidity of the mixture on the basic properties of foamed concrete dry mineralization// In collection: Architecture, construction, transportation materials of International scientific-practical conference. 2015. pp. 518-522. (In Russ)]
10. Gorbach P.S., Shcherbin S.A Vliyaniye penoobrazovatelya na svoystva peny i penobetona//Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. 2014. № 5 (46). S. 126-132. [Gorbach, P. S., Shcherbin S. A. Influence of foaming agent on the properties of foam and aerated concrete//Vestnik of Tomsk state University of architecture and construction. 2014. No. 5 (46). pp. 126-132. (In Russ)]
11. Kucheryavenko D.A Svoystva penobetona neavtoklavnogo tverdeniya s ispol'zovaniyem belkovogo penoobra-zovatelya// V sbornike: Razvitiye dorozhno-transportnogo i stroitel'nogo kompleksov i osvoyeniye strategicheskikh territoriy Sibiri i Arktiki: vklad nauki Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii: elektronnyy resurs. 2014. S. 50-52. [Kucheryavenko D.A.The Properties of non-autoclave hardening foamed concrete with the use of protein foaming agent// In the book: the Development of road transport and construction complexes and the development of the strategically important territories of Siberia and the Arctic: the contribution of science proceedings of the international scientific-practical conference: electronic resource. 2014. pp. 50-52. (In Russ)]
12. Savenkov A.I., Tyul'kin S.V., Shindel' Ye.V .Vzaimosvyaz' vyazhushchego i svoystv tsementnoy matritsy i penobetona//Aspirant. 2016. № 5 (21). S. 146-151. [Savenkov A. I., Tyulkin, S. V., Shindel E.V. The relationship of binder and properties of cement matrix and foam//a Graduate student. 2016. No. 5 (21). pp. 146-151. (In Russ)]
13. New type of super-lightweight magnesium phosphate cement foamed concrete Yue L., Bing, C. Journal of Materials in Civil Engineering. 2015. Т. 27. No. 1. pp. 04014112.
- 14 . Models for prediction the strength and stiffness of foamed concrete at ambient temperature. Mydin Md.A.O. The European researcher. series a. 2014. No. 1-2 (67). pp. 124 - 129.
15. Influence of size factor on creep deformation of fine-grain foam concrete for repair .Bataev D.K.S., Mazhiev Kh.N., Gaziev M.A., Salgiriev R.R., Mazhiev K.Kh., Mazhieva A.Kh. Life science journal. 2014. т. 11. № 12s. pp. 995-997.
16. Disperse reinforcing role in producing non-autoclaved cellular foam concrete Vesova L.M. Procedia Engineering. 2016. Т. 150. pp. 1587-1590.

17. Formirovaniye struktury magnezial'nykh yacheistykh betonov Miryuk O.A. International scientific and practical conference world science. 2016. t. 1. № 3 (7). p. 62-66. [The formation of the structure of magnesia cellular concrete Miryuk O. A. International scientific and practical conference world science. 2016. vol. 1. No. 3 (7). pp. 62-66. (In Russ)]
18. Improving technology of non-autoclave foam concrete. Krasnikova, N. M., Khozin V. G., N. M. Morozov, I. V. Borovskikh, V. E. Eruslanova International Journal of Applied Engineering Research. 2014. T. 9. No. 22. pp. 16735-16741.
19. Sokov V.N., Zhabin D.V., Beglyarov A.E., Zemlyanushnov D.YU. Teoreticheskiye osnovy polucheniya yacheistykh betonov iz penomass, aktiviruyemykh gidroteplosilo-vym polem//Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo. 2012. -№ 12. S. 18-19. [Sokov V. N., Zhabin D. V., Beglyarov A. E., Zemlyanov D. Yu. Theoretical fundamentals of cellular concrete from Panamas activated hydrodiplomacy field//Industrial and civil construction. 2012. - No. 12. pp. 18-19. (In Russ)]
20. Loyko K.O., Belova S.A., Deryabin P.P. Vliyaniye tekuchesti smesi na osnovnyye svoystva penobetona sukhoy mineralizatsii. V sbornike: Arkhitektura, stroitel'stvo, transport materialy Mezhduna-rodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii . 2015. S. 518-522. [Loiko, K. A., Belov S. A., Deryabin p. P. the Influence of fluidity of the mixture on the basic properties of foamed concrete dry mineralization In collection: Architecture, construction, transportation materials of International scientific-practical conference. 2015. pp. 518-522. (In Russ)]
21. Models for prediction the strength and stiffness of foamed concrete at ambient temperature. Mydin Md.A.O. European researcher. series a. 2014. № 1-2 (67). pp. 124-129.
22. Savenkov A.I. Opredeleniye optimal'nogo vodotverdogo otnosheniya dlya penobetona .Sbornik nauchnykh trudov angarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2005. t. 1. № 1. s. 372-374. [Savenkov A. I. Determination of optimum water relations for foam concrete .Collection of scientific works of the Angarsk state technical University. 2005. vol. 1. No. 1. pp. 372-374. (In Russ)]
23. Kolomatskiy A.S., Kolomatskiy S.A. Teploizolyatsionnyye izdeliya iz penobetona // Stroitel'nyye materialy. 2003. №1. S.38-39. [Kolomatskiy A. S. Kolomatskiy S. A. Thermal Insulation products, foam concrete // Building materials. 2003. №1 . pp. 38-39. (In Russ)]
24. Lipilin A.B., Korenyugina N.V. Dezintegrator mokrogo pomola v proizvodstve neavtoklavnoy penobetona//Stroitel'nyye materialy. 2014. №6. S.10-11. [Lipilin A. B., Korenyugina N. V. Disintegrator of wet grinding in the production of non-autoclave foam concrete//Building materials. 2014. №6. pp.10-11. (In Russ)]
25. Bronzova M.K., Vatin N.I., Garifullin M.R. Konstruktsiya karkasnykh zdaniy s primeneniym mono-litnogo penobetona. Stroitel'stvo unikal'nykh zdaniy i sooruzheniy. 2015. № 1 (28). S. 74-90. [Bronzova M.K., Vatin N.I., Garifullin M.R. Design of frame buildings using monolith foam concrete. Construction of unique buildings and structures. 2015. № 1 (28). pp. 74-90. (In Russ)]
26. Vytchikov YU.S., Saparov M.Ye., Golikov V.A. Primeneniye monolitnogo penobetona v ograzhdayushchikh konstruktsiyakh zdaniy i sooruzheniy s peremennym teplovym rezhimom. Gradostroitel'stvo i arkhitektura. 2018. T. 8. № 4 (33). S. 10-14. [Vytchikov Yu.S., Saparev M.E., Golikov V.A. The use of monolithic foam concrete in enclosing structures of buildings and structures with variable thermal conditions. Urban planning and architecture. 2018. Vol. 8. No. 4 (33). pp. 10-14. (In Russ)]
27. Gaydukov A.A. Tselesoobraznost' primeneniya penobetona v Rossii // Alleya nauki. 2017. T. 4, № 10. S. 438–446 [Gaidukov A.A. The feasibility of the use of foam in Russia // Science Alley. 2017. Vol. 4, No. 10. pp. 438–446 (In Russ)]

Сведения об авторах:

Омаров Ариф Омарович – кандидат экономических наук, доцент, заведующий кафедрой «Строительных материалов и инженерных сетей».

Оцоков Камил Алиевич - кандидат технических наук, доцент, кафедра «Технологии и организации строительного производства».

Information about the authors:

Arif O. Omarov – Cand. Sci. (Economics), Assoc. Prof., Department of Construction Technology.

Kamil A. Otsokov – Cand. Sci. (Technical), Assoc. Prof., Department of Technology and organization of construction production.

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 11.09.2018.

Принята в печать 22.09.2018.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 11.09.2018.

Accepted for publication 22.09.2018.

Для цитирования: Четин Т.Э. Особенности формирования и эффективного использования оборотных средств в строительстве. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2018; 45 (3): 231-240. DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-3-231-240

For citation: Chetin T.E. Specifics of formation and effective use of current assets in construction. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2018; 45 (3): 231-240. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-3-231-240

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК: 690.03.13

DOI: 10.21822/2073-6185-2018-45-3-231-240

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ И ЭФФЕКТИВНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОБОРОТНЫХ СРЕДСТВ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Четин Т.Э.

Дагестанский государственный технический университет,
367026 г. Махачкала, пр. И. Шамиля 70, Россия,
e-mail: talat@mail.ru

Резюме. Цель. Целью исследования является выявление особенностей формирования оборотных средств строительных организаций и разработка на этой основе комплекса практических мер, способствующих повышению эффективности их использования. **Метод.** В процессе проведенного исследования использованы системный подход, методы сравнительного и функционально-стоимостного анализа. **Результат.** Обоснована необходимость учета особенностей формирования оборотных средств строительных организаций и развития на этой основе концептуальных положений оперативного управления строительным производством. Систематизированы методические подходы к оценке оборотных средств строительных организаций, обеспечивающие оптимальный выбор источников, форм и объемов их привлечения в строительное производство. Предложен комплекс практических мер по организации системы управления оборотными средствами строительных организаций, обеспечивающий рациональное совокупное формирование и использование всех составляющих. **Вывод.** Предложенные в статье методические подходы к оценке оборотных средств, критерии принятия управленческих решений, этапы разработки системы управления и методические положения по организации управления оборотными средствами создают возможность использования их в качестве методических основ управления оборотными средствами в строительстве, способствуют созданию условий для устойчивого функционирования строительных организаций. Каждое управленческое решение, связанное с определением уровня денежных средств, дебиторской задолженности и производственных запасов, должно быть рассмотрено как с позиции рентабельности данного вида активов, так и с позиции оптимальной структуры оборотных средств и требует применения соответствующих рычагов управления. Реализация основных требований по обеспечению эффективности управления оборотными средствами обуславливает необходимость применения антирисковых экспертно-аналитических процедур, в том числе связанных с функционированием корпоративной информационной системой управления.

Ключевые слова: строительство, оборотные средства, система управления, эффективность, критерии

ECONOMIC SCIENCE

SPECIFICS OF FORMATION AND EFFECTIVE USE OF CURRENT ASSETS IN CONSTRUCTION

Talat E.Chetin

Daghestan State Technical University,
70, I. Shamilya Ave., Mahachkala 367026, Russia,
e-mail: talat@mail.ru

Abstract Objectives This study is aimed at identifying the specifics of managing current assets in construction enterprises and developing a set of practical measures that can enhance the efficiency of their use. **Method** In the course of the study, a system approach was taken, comparative and functional-cost analysis methods. **Result** It is shown that the specifics of current asset formation in construction industry is taken into account when developing a conceptual basis for managing a construction enterprise. Methodological approaches to the estimation of current assets are described, the most effective of which facilitate the optimal choice of sources, forms and volume of attracting current assets into construction industry. A set of practical measures for organizing a system of current asset management in construction enterprises is proposed. These measures are expected to provide for the rational formation and use of all the constituent components of this system. **Conclusion** The methodological approaches to the estimation of current assets, criteria for making managerial decisions, management strategy development stages and methodological provisions for the organisation of the management of current assets presented in this paper can be used as a methodological basis for managing the working assets of a construction enterprise, thus contributing to improved management efficiency and creating conditions for sustainable functionality. Every managerial decision related to determining the level of financial assets, accounts receivable and inventories should be considered from the standpoint of both the profitability of these assets and the optimal structure of current assets, thus requiring respective management levers. The implementation of the basic requirements for the management of current assets necessitates the application of anti-risk expert-analytical procedures, including those related to the functioning of the corporate information management system.

Keywords: construction, current assets, management system, efficiency, criteria

Введение. Оборотные средства имеют большое значение для создания нормальных условий производственной и финансовой деятельности. Рациональная организация управления оборотными средствами имеет первостепенное значение для производственно-хозяйственной деятельности любой строительной организации [1-3].

Оборотные средства строительной организации выступают, прежде всего, как авансируемая в денежной форме стоимость, принимающая в процессе планомерного кругооборота средств форму оборотных фондов и фондов обращения, необходимая для поддержания непрерывности кругооборота и возвращающаяся в исходную форму после его завершения [4].

Являясь стоимостью в денежной форме, оборотные средства уже в процессе кругооборота принимают форму производственных запасов, незавершенного производства, готовой продукции. В процессе кругооборота оборотные средства воплощают свою стоимость в оборотных фондах и посредством последних функционируют в процессе производства, участвуют в формировании издержек производства [5].

Экономическое содержание оборотных производственных фондов воплощено в предметах труда, которые, обслуживая производственный процесс, трансформируются в готовый продукт, полностью перенося на него свою стоимость [6]. Экономическое содержание фондов обращения воплощено в готовой продукции, денежных средствах и средствах в расчетах, обслуживающих процесс обращения общественного продукта. Деление оборотных средств на оборотные производственные фонды и фонды обращения определяется особенностями их использования и распределения в сферах производства и реализации продукции [5-6].

Постановка задачи. Оборотные средства в процессе движения одновременно находятся во всех формах и на всех стадиях кругооборота. При этом достигается непрерывный и ритмичный процесс производства и реализации строительной продукции. Важность рассматриваемой проблемы для обеспечения устойчивого функционирования строительных организаций и предопределила цель и задачи исследования.

Методы исследования. Системный подход к исследованию проблем формирования и использования оборотных средств в строительстве позволил выявить характерные для строительных организаций особенности: высокая степень структурной трансформации, в результате которой они легко могут быть преобразованы из одного вида в другой при регулировании товарного и денежного потоков в операционном процессе; приспособляемость к изменениям конъюнктуры товарного и финансового рынков; возможность потери реальной стоимости из-за инфляции, в связи с естественной убылью, недобросовестностью контрагентов и трудового персонала [5,9].

Общим в структуре оборотных средств различных отраслей строительства является преобладание средств, размещенных в сфере производства. На их долю приходится более 70% всех оборотных средств. Следует также учесть, что структура оборотных средств в строительстве характеризуется следующими показателями: на заготовительной стадии – 20-35%, на производительной стадии – 60-70%, на стадии реализации – 5-10% и зависит от: стоимости сырья, основных материалов, полуфабрикатов; длительности нахождения данных ресурсов, характера кривой нарастания текущих затрат на производственные запасы на денежной стадии; стоимости работ по сооружению объектов; длительности производительной стадии в цикле оборота; характера кривой нарастания затрат на этой стадии; длительности стадии реализации продукции [6, 9].

Одной из основных составляющих оборотных средств являются производственные запасы строительного предприятия, которые, в свою очередь, включают в себя: сырье и материалы, незавершенное производство, готовую продукцию и прочие запасы.

Поскольку строительная организация вкладывает средства в образование запасов, то издержки хранения запасов связаны не только со складскими расходами, но и с риском порчи и устаревания объектов, а также с вмененной стоимостью капитала, т.е. с нормой прибыли, которая могла быть получена в результате других инвестиционных возможностей с эквивалентной степенью риска.

Большинство строительных организаций допускают, что образование запасов имеет такую же степень риска, что и типичные для данного предприятия капитальные вложения, и поэтому при расчете издержек хранения используют среднюю вмененную стоимость капитала предприятия.

Экономический и организационно-производственный результаты от хранения определенного вида текущих активов в том или ином объеме носят специфический для данного вида активов характер. Большое количество заказов на приобретение сырья и материалов, хотя и приводит к образованию больших запасов, тем не менее, имеет смысл, если застройщик сможет добиться от поставщиков снижения цен (так как больший размер заказа обычно предусматривает некоторую льготу, предоставляемую поставщиком в виде скидки). Задача управления — выявить результат и затраты, связанные с хранением запасов.

Дебиторская задолженность — важный компонент оборотных средств строительных организаций. Неоплаченные счета за сданный объект и составляют большую часть дебиторской задолженности. Специфический элемент дебиторской задолженности — векселя к получению, являющиеся по существу ценными бумагами (коммерческие ценные бумаги). Одной из задач управления дебиторской задолженностью являются определение степени риска неплатежеспособности покупателей, расчет прогнозного значения резерва по сомнительным долгам, а также предоставление рекомендаций по работе с фактически или потенциально неплатежеспособными покупателями.

Денежные средства и ценные бумаги — наиболее ликвидная часть оборотных средств. К денежным средствам относятся деньги в кассе, на расчетных и депозитных счетах. Ценные бумаги, составляющие краткосрочные финансовые вложения, включают: ценные бумаги других

предприятий, государственные казначейские билеты, государственные облигации и ценные бумаги, выпущенные местными органами власти.

Выбирая между наличными средствами и ценными бумагами, менеджер решает задачу, подобную той, которую решает менеджер по производству. Всегда существуют преимущества, связанные с созданием большого запаса денежных средств, – они позволяют сократить риск истощения наличности и дают возможность удовлетворить требование оплатить тариф ранее установленного законом срока. С другой стороны, издержки хранения временно свободных, неиспользуемых денежных средств гораздо выше, чем затраты, связанные с краткосрочным вложением денег в ценные бумаги (в частности, их можно условно принять в размере неполученной прибыли при возможном краткосрочном инвестировании). Таким образом, возникает необходимость определения оптимального запаса наличных средств.

У большинства отечественных строительных организаций состояние оборотных средств серьезно ухудшилось вследствие как локальных, так и общих причин: падение уровня производства и продаж, рост цен (особенно на сырье, материалы, комплектующие и другие необходимые элементы производства) и т.д. [7]. На протяжении последнего десятилетия происходили серьезные сбои в кругообороте оборотных средств. Многие строительные организации пытались найти выход в создании страховых запасов дефицитных ресурсов, еще более обострив ситуацию. Поставки материалов и полуфабрикатов в значительной части взяли в свои руки посреднические структуры, реализующие дефицитные материалы и полуфабрикаты со значительными наценками. Большая часть банковских ссуд, полученных на пополнение оборотных средств, расходуется на выплату заработной платы, ограничивая оплату покупных материалов.

Ситуацию с оборотными средствами усложняют также учащающиеся отказы потребителей оплачивать продукцию в связи с ее несоответствием качеству и техническим стандартам, либо нептежеспособностью. С другой стороны, сложившаяся практика предоплаты в подобных ситуациях наносит ущерб заказчику. В итоге растет потребность в дополнительных и весьма значительных оборотных средствах. В то же время проблема дефицита оборотных средств создана на искусственном занижении величины материальных затрат в составе себестоимости работ.

Отсутствие на строительных организациях необходимого уровня оборотных средств, низкий уровень платежной дисциплины привели к возникновению взаимных неплатежей. Дебиторская задолженность за выполненные строителями работы в среднем составляет 60% их объема. Строительные организации несут убытки от иммобилизации оборотных средств, в состав которых входит дебиторская задолженность, замедляется оборачиваемость оборотных средств. Имущественное, финансовое, экономическое положение почти 40% отечественных строительных предприятий в настоящее время можно охарактеризовать как крайне сложное, а степень их деловой активности как крайне слабую.

В тоже время строительный комплекс отличается самым высоким среди отраслей экономики показатель доходности долгосрочных и краткосрочных финансовых вложений, достаточный уровень самофинансирования (69,1%). Вместе с тем, действовали и факторы, оказывающие отрицательное влияние на финансовые параметры: увеличение убыточности активов, низкий темп накопления капитала, наличие значительной просроченной кредиторской и дебиторской задолженностей.

Финансовые показатели строительных организаций характеризовались ухудшением (табл. 1). Финансовое положение строительных организаций, исходя из динамики основных показателей, и, вследствие низкой рентабельности всех видов деятельности, особенно строительных отделочных работ (6,2%), можно охарактеризовать как неудовлетворительное.

Таблица 1. Основные финансовые показатели строительных организаций в 2017 г.*
Table 1. Main financial indicators of construction organizations in 2017 *

Показатели	Всего	из него по видам деятельности			
		строительство зданий	строительство инженерных сооружений	производство электро-монтажных, санитарно-технических и прочих строительно-монтажных работ	работы строительные отделочные
Сальдированный финансовый результат (прибыль минус убыток):					
млн. руб.	-30377	-19227	-31680	7435	813
в процентах к предыдущему году	-	-	-	в 4,1 р.	143,2
Сумма прибыли, млн. руб.	265762	125750	81806	15568	1182
Удельный вес прибыльных организаций в общем числе организаций, процентов	67,2	65,1	68,3	74,7	80,0
Сумма убытка, млн. руб.	296139	144977	113486	8133	369
Удельный вес убыточных организаций в общем числе организаций, процентов	32,8	34,9	31,7	25,3	20,0
Рентабельность проданной продукции (работ, услуг), процентов	3,8	4,2	3,3	4,7	6,2

*Составлено автором на основании [7]

Среди основных причин снижения прибыли выделяется значительное увеличение (в 6 раз) величины процентов, подлежащих уплате, высокая доля убыточных предприятий (32,8%) [7].

Рентабельность строительного производства за 2017 год составила 3,8%. Доля убыточных организаций в строительстве в 2017 году составила 37,8%, сумма убытка этих предприятий – 29,6 млн. рублей.

Отрицательным фактором служит существенное увеличение размера кредиторской задолженности и займов на фоне нерентабельности инвестиционных активов (-4,5%).

На рост величины непокрытых убытков оказало влияние увеличение в 2 раза в 2017 году по сравнению с 2010 годом объема дебиторской задолженности, в том числе просроченной (табл.2.). Причем, доля просроченной дебиторской задолженности по вине неплатежеспособности покупателей составляет к началу 2018 г. 61%.

Таблица 2. Задолженность строительных организаций (млн.руб.)*
Table 2. Debt of construction organizations (mill. rub.)

Показатели	2010	2015	2016	2017
Суммарная задолженность по обязательствам	2950025	4933806	5226338	5630376
в том числе просроченная	96054	143845	146793	183173
Из суммарной задолженности: 1. Кредиторская задолженность	2144497	3829993	3939352	4327986
в том числе просроченная	85649	89411	91327	127049
2. Задолженность по кредитам банков и займам	805528	1103813	1286986	1302390
в том числе просроченная	10405	54434	55466	56124
Дебиторская задолженность	1497680	2512710	2744024	3108864
в том числе просроченная	62109	100690	123006	124257

*Составлено на основании [7]

На конец 2017г. в строительных организациях кредиторская задолженность превышала дебиторскую задолженность на 1219,1 млрд. рублей, или на 39,2 % (на конец 2016 г. - на 1195,4 млрд. рублей или на 43,6%). Доля просроченной дебиторской задолженности в общем объеме дебиторской задолженности в организациях, осуществляющих деятельность в строительстве, на конец 2017г. составила 4,0% и уменьшилась по сравнению с концом 2016г. на 0,5 процентного пункта [8].

Доля просроченной кредиторской задолженности в общем объеме кредиторской задолженности данных организаций на конец 2017 г. составила 2,9 % и увеличилась по сравнению с концом 2016 г. на 0,6 процентного пункта. В организациях, осуществляющих деятельность в строительстве, на конец 2017г. просроченная кредиторская задолженность составила 127,0 - млрд. рублей и увеличилась по сравнению с 2016г. на 39,1%, просроченная дебиторская задолженность – 124,3 млрд. рублей и на 1,0% соответственно [8].

Незначительный эффект от вкладываемых в строительство средств – результат большого их разброса по многочисленным объектам. Значительная часть строящихся объектов являются долгостроями. При среднем нормативном сроке строительства от 1 до 4 лет, фактические сроки растягиваются до 6-10 лет.

Объем незавершенного строительства по состоянию на 1 января 2017 г. составил порядка 2,2 трлн. руб. По итогам 2016 г. введено в эксплуатацию 244 из 443 строительных объектов, планируемых к вводу в эксплуатацию. Количество объектов, которые находятся в незавершенном строительстве, составляют 12 000 объектов [8]. Реальных шагов по вовлечению объектов незавершенного строительства в хозяйственный оборот (в том числе и путем их реализации) не принимается.

Обсуждение результатов. В этой ситуации особую актуальность приобретает разработка стратегии строительных организаций, направленной на формирование необходимого объема и состава оборотных средств, рационализацию и оптимизацию структуры источников их образования.

Формирование оборотных средств при создании строительной организации подчинено в первую очередь задачам развития ее операционной деятельности [9]. При этом следует иметь в виду, что на первоначальных стадиях жизненного цикла объем операционной деятельности возрастает высокими темпами при условии правильного выбора своей рыночной ниши. Поэтому

формируемые на первоначальной стадии оборотные средства должны располагать определенным резервным потенциалом, обеспечивающим возможности прироста строительной продукции и диверсификации операционной деятельности. Роль и значение ускорения оборачиваемости оборотных средств в формировании прибыли строительной организации определяет необходимость постоянного управления этим процессом на всех стадиях кругооборота средств [10].

Для этого на стадии создания производственных запасов необходимо внедрение экономически обоснованных норм запаса; приближение поставщиков сырья, полуфабрикатов, комплектующих изделий и др. к потребителям; широкое использование прямых длительных связей; расширение складской системы материально-технического обеспечения. На стадии незавершенного производства – ускорение научно-технического прогресса (внедрение прогрессивной техники и технологии, роботизированных комплексов); развитие стандартизации, унификации, типизации; совершенствование форм организации производства, применение более дешевых конструкционных материалов; совершенствование системы экономического стимулирования экономного использования сырьевых и топливно-энергетических ресурсов [10 -13]. На стадии обращения – совершенствование системы расчетов; увеличение объема реализованной продукции вследствие выполнения заказов по прямым связям, сокращение сроков строительства [13 -15].

Одним из важнейших вопросов управления оборотными средствами строительной организации является оценка реального состояния дебиторской задолженности, т. е. оценка вероятности безнадежных долгов. При этом оценка должна производиться отдельно по группам дебиторской задолженности с различными сроками возникновения на основании накопленных на строительном предприятии статистических данных, а также можно воспользоваться услугами экспертов-консультантов.

На уровень дебиторской задолженности влияют следующие основные факторы: оценка и классификация покупателей в зависимости от вида продукции, объема закупок, платежеспособности клиентов, истории кредитных отношений и предполагаемых условий оплаты; контроль расчетов с дебиторами, оценка реального состояния дебиторской задолженности; анализ и планирование денежных потоков с учетом коэффициентов инкассации. В основе оценки дебиторской задолженностью нами рекомендованы два методических подхода: сравнение дополнительной прибыли с затратами и потерями, возникающими при изменении политики реализации продукции; сравнение и оптимизация величины и сроков дебиторской задолженности. Данные сравнения проводятся по уровню кредитоспособности, времени отсрочки платежа, стратегии скидок, доходам и расходам, по инкассации.

Управление дебиторской задолженностью предполагает, прежде всего, контроль за оборачиваемостью средств в расчетах [16-18]. Ускорение оборачиваемости в динамике рассматривается как положительная тенденция. Большое значение имеют отбор потенциальных покупателей и определение условий оплаты товаров, предусматриваемых в контрактах. Отбор осуществляется с помощью неформальных критериев: соблюдение платежной дисциплины в прошлом, прогнозные финансовые возможности покупателя по оплате запрашиваемого им объема товаров, уровень текущей платежеспособности, уровень финансовой устойчивости, экономические и финансовые условия предприятия-продавца (затоваренность, степень нуждаемости в денежной наличности и т.п.).

Если строительная организация сдерживает рост оборотных средств, стараясь минимизировать их — удельный вес оборотных средств в общей сумме всех средств предприятия низок, а период оборачиваемости оборотных средств краток — это признаки консервативного подхода к формированию оборотных средств. Такой подход ведут либо в условиях достаточной определенности ситуации, когда объем продаж, сроки поступлений и платежей, необходимый объем запасов и точное время их потребления и т. д. известны заранее, либо при необходимости строжайшей экономии буквально на всем. Консервативный подход к формированию оборотных средств обеспечивает высокую экономическую рентабельность активов, но несет в себе чрезмерный риск возникновения неплатежеспособности из-за малейшей заминки или ошибки в расчетах, ведущей к десинхронизации сроков поступлений и выплат предприятия.

Консервативный подход к формированию оборотных средств предусматривает не только полное удовлетворение текущей потребности во всех их видах, обеспечивающих нормальный ход хозяйственной деятельности, но и создание высоких размеров их резервов на случай непредвиденных сложностей в обеспечении строительного предприятия сырьем и материалами, ухудшения внутренних условий производства продукции, задержки инкассации дебиторской задолженности и т. п. [16]. Такой подход гарантирует минимизацию операционных и финансовых рисков, но отрицательно сказывается на эффективности использования оборотных средств – их оборачиваемости и уровне рентабельности.

Если строительная организация не ставит никаких ограничений в наращивании оборотных средств, располагает значительными суммами денежных средств, имеет значительные запасы сырья и готовой продукции и, стимулируя покупателей, раздувает дебиторскую задолженность – удельный вес оборотных средств в общей сумме всех средств предприятия высок, а период оборачиваемости оборотных средств длителен, — это признаки агрессивного подхода к формированию оборотных средств. Агрессивный подход способен снять с повестки дня вопрос возрастания риска неплатежеспособности, но не может обеспечить повышенную экономическую рентабельность активов. Агрессивный подход к формированию оборотных средств заключается в минимизации всех форм страховых резервов по отдельным видам оборотных средств [17]. При отсутствии сбоев в ходе хозяйственной деятельности такой подход к формированию оборотных средств обеспечивает наиболее высокий уровень эффективности их использования. Однако любые сбои в осуществлении нормального хода хозяйственной деятельности, вызванные действием внутренних или внешних факторов, приводят к существенным финансовым потерям из иррационального.

Определяющими факторами рационального подхода являются научно-технические, природные, экономические факторы (затраты, сроки) [18]. При рациональном подходе в работе обосновывается возможность применения количественных критериев принятия управленческих решений (оптимизация объема оборотных средств, обеспечение минимизации потерь оборотных средств в процессе их использования, обеспечение необходимой ликвидности оборотных средств, обеспечение повышения рентабельности оборотных средств) [19, 20]. При иррациональном подходе определяющими являются факторы культурного окружения, демографические и политические факторы.

Применяемые критерии – качественные (завоевание престижа предприятия, удовлетворение амбиций руководителя). Количественные критерии являются более универсальной характеристикой, поскольку позволяют оценить эффективность управления оборотными средствами строительного предприятия, основанной на сопоставлении результатов с затратами. Наряду с классическими показателями эффективности использования оборотных средств (коэффициент оборачиваемости, длительность периода оборота, коэффициент загрузки), на наш взгляд, может также служить показатель «рентабельность оборотных средств».

Вывод. Таким образом, рекомендуемые методические подходы к формированию оборотных средств строительного предприятия (или тип политики их формирования), отражая различные соотношения уровня эффективности их использования и риска, в конечном счете, позволяют определить достаточную сумму оборотных средств.

Каждому из перечисленных методических подходов к формированию оборотных средств строительного предприятия должна быть определена соответствующая политика финансирования, т.е. политика управления источниками финансирования оборотных средств. Это условие позволило сформулировать правило, сводящее к минимуму риск потери строительным предприятием ликвидности: чем больше превышение оборотных средств над текущими обязательствами, тем меньше степень риска.

Главной целью управления оборотными средствами является поддержание их минимально допустимого размера, достаточного для обеспечения оптимального уровня ликвидности, рентабельности инвестиций и целей бизнеса, бесперебойной и ритмичной работы строительного предприятия

Библиографический список:

1. Кушнир И. В. Оборотные средства предприятия / И. В. Кушнир // Экономика предприятия. — 2010. — № 13. — С.8.
2. Лехтянская Л. В. Оборотные средства и модернизация производства / Л. В. Лехтянская // Российское предпринимательство. — 2013. — № 5. — С.42-46.
3. Banomyong, R. (2005). Measuring the Cash Conversion Cycle in an International Supply Chain. AnnualLogisticsResearchNetwork, (pp. 7-9). Plymouth.
4. Brealey, R., Myers, S., & Allen, F. (2006). Working Capital Management. In R. Brealy, S. Myers, & F. Allen, Corporate Finance (pp. 813-832). NewYork: McGraw-Hill.
5. Lazaridis, I., &Tryfonidis, D. (2006). Relationship between working capital management and profitability of listed companies in the Athens stock exchange. Journal of Financial Management and Analysis, Vol. 19 (1) 26-35.
6. Rajesh, M., Reddy, (2011). "Impact of working capital management on firms profitability". Global Journal of Finance and Management. Volume 3, N.1, pp.151-158.
7. Строительство в России http://www.gks.ru/free_doc/doc_2018/stroit-2018.pdf
8. Строительный комплекс Российской Федерации в 2017 году http://www.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_main/rosstat/ru/statistics/enterprise/building/#
9. Almazari, A.A. (2013).The Relationship between Working Capital Management and Profitability: Evidence from Saudi Cement Companies. BritishJournalofEconomics, Management&Trade, 4(1).
10. M. Charitou, M. Elfani, and P. Lois, "The Effect of Working Capital Management On Firm's Profitability: Empirical Evidence From An Emerging Market," Journal of Business & Economics Research, vol. 8, No. 12, pp. 63-68, Dec 2010.
11. Бочаров Д. С. Предприятию не хватает оборотных средств: как быть? / Д.С. Бочаров // Российское предпринимательство. — 2011. — № 1. — С.44-47.
12. Бучик Т. А. Оптимизация оборотного капитала / Т. А. Бучик //Финансы, учет, аудит. — 2010. — №6. — С.43.
13. Ковалев В.В. Финансовый анализ: методы и процедуры. – М.: Финансы и статистика, 2002. – 559 с.
14. Карасева И.М. Финансовый менеджмент / И.М. Карасева, М.А. Ревякина. – М.: Омега-Л, 2014. – 335 с.
15. Пузанкевич, О. А. Управление оборотными активами / О. А. Пузанкевич // Финансы. Учет. Аудит. — 2013. — № 9. — С.20-22.
16. Русецкая А. В. Управление источниками формирования оборотных средств предприятия / А. В. Русецкая // Управление корпоративными финансами. — 2014. — № 3. — С.4-5.
17. Савчук В.П. Финансовая диагностика предприятия и поддержка управленческих решений / В.П. Савчук // Экономика. Финансы. Управление. – 2015. – № 1. – С. 73-80
18. Сыч Д. Эффективный метод управления дебиторской задолженностью / Д.Сыч // Финансовый директор. – 2015. – № 1. – С. 24-28.
19. Хилькевич Ю.А. Формирование эффективного механизма планирования оборотных средств / Ю. А. Хилькевич // Финансы. Учет. Аудит. — 2012. — № 8. – С. 17-18.
20. Щитникова И. П. Оборачиваемость средств и деловая активность/И. П. Щитникова // Финансы, учет, аудит. - 2013. - № 1. – С. 22 -25.

References:

1. Kushnir I.V. Oborotnyesredstvapredpriyatija. Jekonomikapredpriyatija. 2010;13:8. [KushnirI.V.Currentassets. Economyofenterprise. 2010;13:8. (In Rus.)]
2. Lehtjanskaja L. V. Oborotnyesredstvaimodernizacijaproizvodstva. Rossijskoepridinimatel'stvo. 2013;5:42–46. [LehtjanskajaL. V.Currentassentsandmodernizationofenterprise. Russianentrepreneurship. 2013;5:42–46. (In Rus.)]
3. Banomyong R. Measuring the cash conversion cycle in an international supply chain. Annual Logistics Research Network. 2005;7-9. Plymouth.
4. Brealey R., Myers S., Allen, F. Working capital management. In R. Brealy, S. Myers, & F. Allen, Corporate Finance. 2006;813-832. NewYork: McGraw-Hill.
5. Lazaridis I., TryfonidisD. Relationship between working capital management and profitability of listed companies in the Athens stock exchange.Journal of Financial Management and Analysis. 2006;19(1): 26-35.
6. Rajesh M., Reddy. Impact of working capital management on firm's profitability. Global Journal of Finance and Management. 2011; 3(1):151-158.
7. Construction in Russia Statistical collection Rosstat, 2017 http://www.gks.ru/free_doc/doc_2018/stroit-2018.pdf
8. Building complex of the Russian Federation in 2017 http://www.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_main/rosstat/ru/statistics/enterprise/building/#
9. Almazari A.A. The relationship between working capital management and profitability: evidence from saudi cement companies. British Journal of Economics, Management & Trade. 2013; 4(1).
10. Charitou M.,Elfani M., LoisP.The effect of working capital management on firm's profitability: empirical evidence from an emerging market.Journal of Business & Economics Research. 2010; 8(12): 63-68.

11. Bocharov D. S. Predpriyatiju ne hvataet oborotnyhsredstv: kak byt'? Rossijskoepredprinimatel'stvo. 2011;1:44–47 [Bocharov D. S. An enterprise is lacking money: How to act? Russian entrepreneurship. 2011;1:44–47. (In Rus.)]
12. Buchik T. A. Optimizacija oborotnogokapitala. Finansy, uchet, audit. 2010;6:43. [Buchik T. A. Optimization of current assets. Finance. Accounting. Audit. 2010;6:43. (In Rus.)]
13. Kovalev V.V. Finansovyj analiz: metody i procedury. M.: Finansy i statistika, 2002. [Kovalev V.V. Financial analysis: Methods and procedures. M.: Finance and Statistics, 2002. (In Rus.)]
14. Karaseva I.M. Finansovyj menedzhment. Red. I.M. Karaseva, M.A. Revjakina. M. Omega-L, 2014. 335p. [Karaseva I.M. Financial Management. Ed. I.M. Karaseva, M.A. Revjakina. M. Omega-L, 2014. 335p. (In Rus.)]
15. Puzankevich O. A. Upravlenie oborotnymi aktivami. Finansy. Uchet. Audit. 2013;9:20–22. [Puzankevich O. A. Management of current assets. Finance. Accounting. Audit. 2013;9:20–22. (In Rus.)]
16. Ruseckaja A. V. Upravlenie i stochnikami formirovaniya oborotnyhsredstv predpriyatija. Upravlenie korporativnymi finansami. 2014;3:4–5. [Ruseckaja A. V. Management of sources of current assets formation. 2014;3:4–5. (In Rus.)]
17. Savchuk V.P. Finansovaya diagnostika predpriyatija i podderzhka upravlencheskihreshenij. Ekonomika. Finansy. Upravlenie. 2015;1:73–80. [Savchuk V.P. Financial diagnostics of an enterprise and support of managerial decisions. Economics. Finance. Management. 2015;1:73–80. (In Rus.)]
18. Sych D. Jeffektivnyjmetodu pravljenija debitorskoj zadolzhennost'ju. Finansovyj direktor. 2015;1:24–28. [Sych D. Effective method for managing accounts receivable. Financial director. 2015;1:24–28. (In Rus.)]
19. Hil'kevich Ju.A. Formirovaniej jeffektivnogo mehanizma planirovaniya oborotnyhsredstv. Finansy. Uchet. Audit. 2012;8:17–18. [Hil'kevich Ju.A. Formation of an effective mechanism for current asset planning. Finance. Accounting. Audit. 2012;8:17–18. (In Rus.)]
20. Shhitnikova I. P. Oborachivaemost' sredstv i delovajaaktivnost'. Finansy. Uchet. Audit. 2013;1:22–25. [Shhitnikova I. P. Fund turnover or business activity? Finance. Accounting. Audit. 2013;1:22–25. (In Rus.)]

Сведения об авторах:

Четин Талат Энверович – соискатель.

Information about the author.

Talat E. Chetin

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 02.07.2018.

Принята в печать 30.08.2018.

Conflict of interest.

The author declare no conflict of interest.

Received 02.07.2018.

Accepted for publication 30.08.2018.

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 науки и высшего образования Российской Федерации
Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation



ВЕСТНИК
ДАГЕСТАНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА.
ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ
Махачкала, Том 45– №3 – 2018.

HERALD
OF DAGHESTAN STATE TECHNICAL UNIVERSITY. TECHNICAL SCIENCES
Makhachkala, Volume 45, No.3, 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 30.09.2018г. Сдано в печать 30.09.2018г.

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.