

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 48, № 1, 2021.

ВЕСТНИК

**ДАГЕСТАНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА.**

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Volume 48, No.1, 2021.

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); ROAD, Research4Life; LENS.ORG; OpenAIRE; Соционет, КиберЛенинка, Microsoft Academic

© Учредитель и издатель ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет», 2021.

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); ROAD; Research4Life; LENS.ORG; OpenAIRE; Socionet; Cyber-Leninka, Microsoft Academic.

© Founder and Publisher Daghestan State Technical University, 2021.

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Дагестанский государственный технический университет»

ВЕСТНИК ДАГЕСТАНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА. ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ. ТОМ 48, № 1, 2021

Главный редактор: Исмаилов Т.А., д.т.н., профессор, президент Дагестанского государственного технического университета, Махачкала, Россия.

Заместитель главного редактора:

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

Редакционная коллегия:

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

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

Алиев Р.М., д.т.н., профессор, зав. кафедрой Дагестанского государственного технического университета, г. Махачкала, РФ.

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

Ахмедов Г.Я., д.т.н., профессор, зав. кафедрой Дагестанского государственного технического университета, г. Махачкала, РФ.

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

Баширов М.М., д.т.н., профессор Азербайджанского государственного технического университета, г. Баку, Азербайджанская республика.

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

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

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

Каргин Н.И., д.т.н., профессор, проректор, зам. директора Института функциональной ядерной электроники Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Москва, РФ.

Кобзаренко Д.Н., д.т.н., профессор Института проблем геотермии Дагестанского научного центра РАН, г. Махачкала, РФ.

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

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

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

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

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

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

Маркосян М.В., д.т.н., профессор, директор ЗАО «Ереванский НИИ средств связи», г. Ереван, Республика Армения.

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

Мустафаев А.Г., д.т.н., профессор Дагестанского государственного технического университета, г. Махачкала, РФ.

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

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

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

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

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

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

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

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

Редакционный совет:

Председатель редакционного совета:

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

Сопредседатели:

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

Исмаилов Т.А., д.т.н., профессор, президент Дагестанского государственного технического университета, г. Махачкала, РФ.

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

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

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

Тимошин С.И., д.ф.-м.н., академик Белорусской инженерной академии, профессор, ректор Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого, г. Гомель, Республика Беларусь.

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

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

Группы научных специальностей

05.04.03 – Машины и аппараты, процессы холодильной и криогенной техники, систем кондиционирования и жизнеобеспечения,

05.04.13 – Гидравлические машины и гидропневмоагрегаты

05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям)

05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям)

05.13.10 – Управление в социальных и экономических системах

05.13.12 – Системы автоматизации проектирования (по отраслям)

05.13.18 – Математическое моделирование численные методы и комплексы программ

05.13.19 – Методы и системы защиты информации, информационная безопасность

05.23.03 – Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение (технические науки),

05.23.05 – Строительные материалы и изделия (технические науки),

05.23.17 – Строительная механика

05.23.19 – Экологическая безопасность строительства и городского хозяйства

Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки.

Том 48, № 1
Махачкала, 2021 – 160 с.

Издается по решению Ученого Совета

ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет»

Адрес учредителя и издателя:

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/>

СОДЕРЖАНИЕ

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ8

А.Ю. Баранов, Л.В. Иванов, А.М. Андреев

РАСЧЕТ РЕЖИМОВ БЕЗДРЕНАЖНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ СУДОВЫХ КРИОГЕННЫХ ТАНКОВ ТИПА «С»8

Л.В. Галимова, Д.З. Байрамов

КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ АБСОРБЦИОННОЙ БРОМИСТОЛИТИЕВОЙ ХОЛОДИЛЬНОЙ МАШИНЫ В СОСТАВЕ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ ПГУ-110 и АБХМ 18

О.В. Евдулов, Р.А.-М. Магомадов, К.А. Магомедова, Э.А. Джабраилова

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ ОБЪЕКТОВ28

И.Е. Лобанов

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА НА ВОЗДУХЕ В КРУГЛЫХ ТРУБАХ С ТРЕУГОЛЬНЫМИ И КВАДРАТНЫМИ ТУРБУЛИЗАТОРАМИ ДЛЯ ВЫСОКИХ, ВПЛОТЬ ДО МИЛЛИОНА, КРИТЕРИЕВ РЕЙНОЛЬДСА37

И.С. Медведков

КОСВЕННЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МАССЫ СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА В КРИОГЕННЫХ ТРАНСПОРТНЫХ РЕЗЕРВУАРАХ51

А.А. Сидоров, А.К. Ястребов

ИНТЕГРАЦИЯ МОДУЛЯ ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ КИНЕТИЧЕСКОГО УРАВНЕНИЯ В CFD-ПАКЕТ ДЛЯ ЗАДАЧИ ОБЪЕМНОЙ КОНДЕНСАЦИИ ПРИ ИСТЕЧЕНИИ ПАРОГАЗОВОЙ СМЕСИ ЧЕРЕЗ СОПЛО65

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ76

В.В. Грызунов

МОДЕЛЬ ГЕОИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ FIST, ИСПОЛЬЗУЮЩЕЙ ТУМАННЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ДЕСТАБИЛИЗАЦИИ76

А.М. Каднова

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ОПЕРАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ90

А.С. Лосев

БУТСТРЕП МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ЗОНАЛЬНОГО РАЗРУШЕНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД ВОКРУГ ПОДЗЕМНЫХ ВЫРАБОТОК 100

В.Б. Мелехин, М.В. Хачумов

ОБ ОДНОМ ПОДХОДЕ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ КОММИВОВАЖЕРА ДЛЯ ПЛАНИРОВАНИЯ
АВТОНОМНЫМ БЕСПИЛОТНЫМ ЛЕТАТЕЛЬНЫМ АППАРАТОМ МАРШРУТОВ ОБЛЕТА
ЦЕЛЕЙ 108

Е.С. Овчинникова

ГРАФОВЫЕ МОДЕЛИ ДИНАМИКИ РЕАЛИЗАЦИИ СЕТЕВЫХ АТАК
В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ ОРГАНОВ ВНУТРЕННИХ ДЕЛ 119

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА 130

А.Л. Большеротов

МОДЕЛЬ КОМПЛЕКСНОЙ СИСТЕМЫ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ
СТРОИТЕЛЬСТВА 130

А.К. Юсупов, Х.М. Муселемов, Т.О. Устарханов

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ШПРЕНГЕЛЬНЫХ БАЛОК С ОПТИМАЛЬНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ 141

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ 155

CONTENTS

POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL MECHANICAL ENGINEERING	8
<i>A.Yu. Baranov, L.V. Ivanov, A.M. Andreev</i>	
CALCULATION OF THE DRAINLESS OPERATION MODES OF TYPE C VESSEL CRYOGENIC TANKS	8
 <i>L.V. Galimova, D.Z. Bayramov</i>	
COMPREHENSIVE ANALYSIS OF THE ABSORPTION LITHIUM BROMIDE REFRIGERATING MACHINE AS PART OF THE CCGT-110 AND ALBRM POWER SYSTEM	18
 <i>O.V. Evdulov, R.A.-M. Magomadov, K.A. Magomedova, E.A. Dzhabrailova</i>	
MATHEMATICAL MODEL OF A THERMOELECTRIC SEMICONDUCTOR SYSTEM FOR VISUALIZING THE TEMPERATURE FIELDS OF OBJECTS	28
 <i>I.E. Lobanov</i>	
SIMULATION OF AIR HEAT TRANSFER IN CIRCULAR PIPES WITH TRIANGULAR AND SQUARE TURBULENCE STIMULATORS FOR HIGH REYNOLDS CRITERIA UP TO ONE MILLION	37
 <i>I.S. Medvedkov</i>	
INDIRECT METHODS FOR DETERMINING THE MASS OF LIQUEFIED NATURAL GAS IN CRYOGENIC TRANSPORTATION TANKS	51
 <i>A. A. Sidorov, A.K. Yastrebov</i>	
INTEGRATION OF THE NUMERICAL SOLUTION MODULE OF THE KINETIC EQUATION INTO THE CFD PACKAGE FOR THE VOLUME CONDENSATION PROBLEM OF THE VAPOR-GAS MIXTURE FLOW THROUGH A NOZZLE	65
COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT	76
 <i>V.V. Gryzunov</i>	
FIST GEOINFORMATION SYSTEM MODEL USING FOG COMPUTING IN DESTABILIZATIO	76
 <i>A.M. Kadnova</i>	
EXPERIMENTAL EVALUATION OF THE OPERATIONAL CHARACTERISTICS OF INFORMATION PROTECTION SYSTEMS	90
 <i>A.S. Losev</i>	
BOOTSTRAP METHODS FOR INVESTIGATING THE ROCK MASS ZONAL FRACTURE AROUND UNDERGROUND WORKINGS	100

V.B. Melekhin, M.V. Khachumov

ON ONE APPROACH TO SOLVING THE TRAVELING SALESMAN PROBLEM FOR AUTONOMOUS UNMANNED AERIAL VEHICLE PLANNING OF TARGET FLIGHT PATHS108

E.S. Ovchinnikova

GRAPH MODELS OF THE DYNAMICS OF NETWORK ATTACKS IN AUTOMATED SYSTEMS OF INTERNAL AFFAIRS BODIES119

BUILDING AND ARCHITECTURE130

A.L. Bolsherotov

MODEL OF AN INTEGRATED ENVIRONMENTAL SAFETY SYSTEM FOR CONSTRUCTION 130

A. K. Yusupov, H. M. Muselemov, T.O.Ustarhanov

EFFICIENCY OF STRUT-FRAMED BEAMS WITH OPTIMAL PARAMETERS. 141

FORMATTING REQUIREMENTS FOR PAPERS155

Для цитирования: А.Ю. Баранов, Л.В. Иванов, А.М. Андреев. Расчет режимов бездренажной эксплуатации судовых криогенных танков типа «С». Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2021; 48 (1): 8-17. DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-1-8-17

For citation: A.Yu. Baranov, L.V. Ivanov, A.M. Andreev. Calculation of the drainless operation modes of type C vessel cryogenic tanks. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2021; 48 (1): 8-17. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-1-8-17

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL MECHANICAL ENGINEERING

УДК 621.642.86

DOI: 10.21822/2073-6185-2021-48-1-8-17

РАСЧЕТ РЕЖИМОВ БЕЗДРЕНАЖНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ СУДОВЫХ КРИОГЕННЫХ ТАНКОВ ТИПА «С»

А.Ю.Баранов, Л.В. Иванов, А.М. Андреев

Санкт-Петербургский научно-исследовательский университет
информационных технологий, механики и оптики,
191002, г. Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, Россия

Резюме. Цель. Для нужд автономной газификации необходимо создавать речные суда для перевозки сжиженного природного газа (СПГ) и отрабатывать технологию транспортирования. В качестве наиболее рациональной системы хранения груза выбраны танки типа «С», которые могут эксплуатироваться в бездренажном режиме. **Метод.** Существующая методика определения уровня первоначального заполнения танка не учитывает время хранения СПГ, что приводит к вынужденному сбросу образовавшихся паров СПГ при достижении максимально допустимого избыточного давления в танке. При модернизации танкера в средство транспортирования СПГ авторами предлагается установка на него двух танков типа «С». Диаметр полусферических крышек 9 м, длина цилиндрической части танка 20 м. Максимально допустимое избыточное давление внутри танка принято равным 0,65 МПа. Толщина тепловой изоляции определена из габаритных размеров трюма с учетом условия обеспечения расстояния между боковой стенкой корпуса и наружным изоляционным слоем не менее 760 мм. Максимально возможная толщина слоя теплового ограждения составила 1,1 м. **Результат.** В статье предложена методика определения оптимального уровня заполнения танка для достижения бездренажного режима работы. Предложенная методика может позволить добиться максимальной экономической эффективности транспортирования СПГ за счет исключения потерь сбрасываемого СПГ для длительных переходов судна и транспортирования дополнительного объема СПГ для коротких переходов. **Вывод.** При увеличении давления паров СПГ внутри танка растет температура насыщения жидкой фракции и снижается ее плотность. Из-за этого доля объема занятого жидкостью постоянно возрастает, уменьшая паровое пространство емкости. Увеличение массы паров СПГ в сочетании с уменьшением объема паровой зоны повышают темп роста давления. При оптимизации начального уровня заполнения танка определено количество СПГ, которое будет вынуждено сброшено в виде пара на длинных перегонах. Оптимизация режима эксплуатации танков типа «С» возможна для случаев с любой толщиной изоляционного слоя. При выполнении подобных расчетов можно составлять таблицы оптимального заполнения для перегонов любой дальности.

Ключевые слова: танки типа «С», автономная газификация, бездренажное хранение, газозаполненная изоляция, отпарной газ, BOR

CALCULATION OF THE DRAINLESS OPERATION MODES OF TYPE «C» VESSEL CRYOGENIC TANKS

A.Yu. Baranov, L.V. Ivanov, A.M. Andreev

Saint Petersburg Research University of Information Technology, Mechanics and Optics,
9 Lomonosov St., St. Petersburg 191002, Russia

Abstract. Objective. For autonomous gasification, it is necessary to create river vessels to transport liquefied natural gas and work out the transportation technology. As the most efficient cargo storage system, C-type tanks are selected and operated in a non-drainage mode. **Methods.** The existing methodology for determining the level of initial filling of the tank does not consider the storage time of liquefied natural gas, which leads to the forced discharge of the formed liquefied natural gas vapors when the maximum allowable overpressure in the tank is reached. When upgrading a tanker into a transportation vessel for liquefied natural gas, the authors propose to install two C-type tanks on it. The diameter of the hemispherical covers is 9 m, the length of the cylindrical part of the tank is 20 m. The maximum permissible overpressure inside the tank is assumed to be 0.65 MPa. The thickness of the thermal insulation is determined from the overall dimensions of the hold, considering the condition of ensuring a distance between the hull sidewall and the outer insulation layer of at least 760 mm. The maximum possible thickness of the thermal layer was 1.1 m. **Results.** The article proposes a method for determining the optimal tank filling level to achieve a drainless operation mode. The proposed method can achieve the maximum economic efficiency of transportation of liquefied natural gas by eliminating the loss of discharged liquefied natural gas due to long ship crossings and transporting an additional liquefied natural gas volume for a short changeover. **Conclusion.** As the pressure of liquefied natural gas vapor increases inside the tank, the saturation temperature of the liquid fraction increases, and its density decreases. Thus, the proportion of the liquid volume is constantly increasing, reducing the vapor space of the container. An increase in the mass of liquefied natural gas vapors combined with a decrease in the steam area volume increases the pressure growth rate. When optimizing the initial tank filling level, the amount of liquefied natural gas that will be forced to be discharged as steam on long legs is determined. Optimization of the operating mode of type C tanks is possible for cases with any thickness of the insulation layer. When performing such calculations, tables of optimal filling for any range of legs can be created.

Keywords: type C tanks, autonomous gasification, drainless storage, gas-filled insulation, steam gas, BOR

Введение. Логистика энергоносителей в восточной части России организована крайне нерационально. Существует проблема с топливным снабжением населенных пунктов в северных регионах России. Основной энергоноситель – дизельное топливо (ДТ) доставляется в ряд регионов (Красноярский край, ЯНАО, Якутия и др.).

С Омского НПЗ, находящегося на юго-востоке России, дизельное топливо доставляется до нефтебаз, откуда развозится по магистральным рекам малотоннажными танкерами. Эта система снабжения топливом в значительной степени формирует сезонную логистическую компанию, которую часто называют «Северный завоз».

Расстояние между местом производства и потребления ДТ в ряде случаев неоправданно велико. Последнее время именно на северо-востоке России разворачивается производство СПГ. СПГ имеет множество преимуществ: он энергоэффективнее и экологичнее ДТ. Плечо его доставки от места производства до места потребления значительно короче.

Постановка задачи. Выбор рациональной схемы для снабжения потребителей сжиженного природного газа (СПГ) является важной технико-экономической задачей развития внутреннего рынка энергоносителей Российской Федерации. Применительно к северо-восточным регионам страны, отличающимся низкой плотностью населения и большой продолжительностью отопительного периода, поставки СПГ представляются крайне привлекательными, так как СПГ может использоваться в автономных системах газификации и в качестве моторного топлива. Учитывая слаборазвитую сеть автомобильных и железнодорожных магистралей, единственным способом транспортирования СПГ является водный транспорт.

СПГ уже производится на заводе Ямал СПГ на полуострове Ямал. В стадии строительства и разработки находится ГПЗ на Гыданском полуострове (Проект АрктиСПГ-2) и в Якутии (Проект Якутский ГПЗ). С учетом этого, Ямальский район ЯНАО, северные районы Краснояр-

ского края по побережью Енисея, а также заречные улусы Якутии могут быть в ближайшее время газифицированы за счет поставок СПГ водным транспортом [1].

При организации транспортирования СПГ малотоннажными судами, наиболее рациональной системой хранения груза являются танки типа «С» [2]. Танки типа «С» конструктивно представляют криогенные резервуары, рассчитанные на работу с высоким внутренним давлением. В штатном режиме эксплуатации испарившийся СПГ не удаляется из танка, а остается внутри, повышая внутреннее давление. В экстремальной ситуации при достижении максимального допустимого избыточного давления – часть пара сбрасывается из танка через аварийную арматуру, через факельную систему.

Потеря части перевозимого СПГ при транспортировании увеличивает транспортные издержки. Утилизация паров в факельной установке или в главном двигателе судна усложняет эксплуатацию. Необходимо исключить работу емкости в экстремальном режиме.

Методы исследования. Для снижения теплопритоков из окружающей среды в конструкции криогенной емкости используют различные типы тепловых ограждений. Для малотоннажных танкеров наиболее технологичным видом теплоизоляции является напыляемая пенополиуретановая пена, покрытая праймером [3].

Организация транспортирования СПГ отличается от перевозки традиционных криопродуктов: азота, аргона или кислорода. По соображениям экологической безопасности сброс паров СПГ в окружающую среду запрещен, поэтому перевозка часто проходит в «бездренажном» режиме. При этом пары СПГ не отводятся через дренажную арматуру, а накапливаются в паровом пространстве криогенной емкости.

За пределами России в бездренажном режиме транспортируют почти все криопродукты, так как это позволяет повысить степень использования криогенной емкости почти до 100%. Но для бездренажного транспортирования криопродуктов нужны криососуды, рассчитанные на высокое (0,6 – 0,8 МПа) давление, а продолжительность перевозки следует сводить к минимуму.

В условиях ограничения диапазона рабочих давлений необходимо разработать технологические приемы бездренажного длительного транспортирования СПГ по рекам.

Поскольку длина перегонов между точкой загрузки и точкой слива СПГ различна – величина максимального избыточного давления паров будет различаться. Максимально избыточное давление – фиксированная величина, которая определяется конструктивными параметрами танка.

Для предупреждения работы емкости в экстремальном режиме можно выбирать уровень первоначального заполнения таким образом, чтобы максимальное давление в танке устанавливалось не ранее окончания перегона.

Расстояния перевозок СПГ варьируются от нескольких десятков до нескольких сотен километров, поэтому разница в начальном уровне начального заполнения танков жидкостью может быть значительной. Необходимо создать алгоритм выбор оптимального заполнения танков криогенной жидкостью в зависимости от продолжительности доставки груза.

Исследования проведены в виде численного эксперимента на математической модели криогенных хранилищ, предназначенных для установки на модернизированный танкер класса река-море «Ленанефть Проект 621». Этот тип танкеров в настоящий момент не может эксплуатироваться из-за несоответствия нормативам безопасности МАРПОЛ для малых танкеров дедвейтом меньше 5000 т [4].

При модернизации этого танкера в средство транспортирования СПГ предлагается установка на него двух танков типа «С». Диаметр полусферических крышек 9 м, длина цилиндрической части танка 20 м. Максимально допустимое избыточное давление внутри танка принято равным 0,65 МПа. Толщина тепловой изоляции определена из габаритных размеров трюма с учетом условия обеспечения расстояния между боковой стенкой корпуса и наружным изоляционным слоем не менее 760 мм [5]. Максимально возможная толщина слоя теплового ограждения составила 1,1 м. Схема мидель-шпангоута, с расположенным танком приведена на рис. 1.

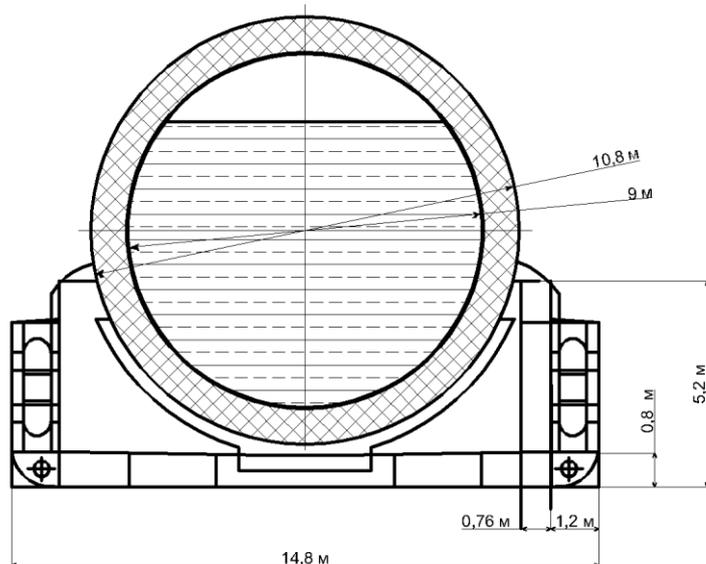


Рис.1. Мидель-шпангоут танкера после модернизации
Fig. 1. Tanker midship frame after modernization

Увеличить диаметр криогенного танка более 9 м нельзя, так как в таком случае вес системы значительно возрастет. Поэтому свободное пространство трюма использовано для размещения напыляемой тепловой изоляции, плотность которой 34-35 кг/м³. Увеличение толщины изоляционного слоя не вызывает существенного увеличения общей массы грузовых танков.

Обсуждение результатов. Основу математической модели криогенного хранилища составляет уравнение энергии для жидкой и паровой фракции [6-7]. С учетом принятых ограничений необходимо описать процессы, протекающие в единице объема хранилища. При этом энтальпия внутри этого объема является функцией от внутренних источников q_v и теплоты, подводимой в этот элементарный объем по трем осям q_x , q_y и q_z .

$$\rho_{жс} \cdot \frac{dh_{жс}}{d\tau} = \frac{dq_x}{dx} + \frac{dq_y}{dy} + \frac{dq_z}{dz} + q_v.$$

Ранее было указано, что хранение СПГ бездренажное, т.е.:

$$\frac{dq_x}{dx} = \frac{dq_y}{dy} = \frac{dq_z}{dz} = 0.$$

Распределенные источники теплоты складывается из теплопритока из окружающей среды q_{oc} и теплоты, поглощаемой при испарении жидкости:

$$q_v = q_{oc} + \frac{dg_{жс}}{d\tau}.$$

Применим метод замены переменных и получим упрощенную запись уравнения:

$$\rho_{жс} \cdot \frac{\Delta h_{жс}}{\Delta \tau} = q_v.$$

Отсюда получается алгебраическое выражение пригодное для вычисления энтальпий жидкости в следующий момент времени:

$$h'_{жс} = h_{жс} + \frac{q_v \cdot \Delta \tau}{\rho_{жс}}.$$

После того, как будет вычислено новое значение энтальпии жидкости на новом временном слое, может сложиться одна из трех возможных ситуаций:

1. Энтальпия жидкости на новом временном слое больше, чем энтальпия насыщенной жидкости – т.е. жидкость перегрета. В этом случае инициализируется процесс парообразования: $h'_{жс} > h' = f(P_n)$, $\Delta g_{жс} > 0$.

2. Энтальпия жидкости равна энтальпии насыщенной жидкости при текущем давлении (нет парообразования): $h'_{жс} = h' = f(P_n)$, $\Delta g_{жс} = 0$.

3. Энтальпия жидкости меньше энтальпии насыщенной жидкости при текущем давлении. В этом режиме также не происходит парообразования, так как жидкость находится в недогретом состоянии: $h'_{жс} < h' = f(P_n)$, $\Delta g_{жс} = 0$.

В тех случаях, когда новое значение энтальпии жидкости оказывается выше энтальпии насыщенной жидкости, выполняется расчет потерь жидкости за счет испарения.

Количество потерянной жидкости вычисляется с учетом удельной массы жидкости и отношения к разности энтальпий насыщенной жидкости, отнесенной к теплоте парообразования жидкого СПГ при данном давлении.

h'' – это давление насыщенных паров при текущем значении давления пара $h'' = f(P_n)$.

$$\Delta g_{жс} = g_{жс} \cdot \frac{(h'_{жс} - h')}{h'' - h'}$$

После того, как будут определены потери жидкости от испаряемости, вычисляется масса жидкости на новом временном слое:

$$g'_{жс} = g_{жс} - \Delta g'_{жс}$$

По известной плотности жидкой фракции $\rho_{жс} = f(P_n)$ рассчитывается удельный объем занимаемой жидкостью на новом временном слое: $v'_{жс} = g'_{жс} / \rho_{жс}$.

Объем, который будет занимать пар на новом временном слое: $v'_n = 1 - v'_{жс}$.

Расчетное значение потерь жидкости от испаряемости позволяет определить количество пара, которое будет находиться в паровом пространстве на новом временном слое:

$$g'_n = g_n + \Delta g$$

По массе пара же рассчитывается плотность пара на новом временном слое:

$$\rho'_n = \frac{g'_n}{v'_n}$$

Для того чтобы определить текущее давление паров СПГ используется матрица давлений, которая описывает зависимость плотности от давлений в следующем интервале:

$$0,1 \leq P_i \leq 2 \text{ МПа.}$$

Сравнивая новое значение плотности пара в паровом пространстве с табличными значениями плотности паров при различных давлениях [8], выбираются значений давлений, при котором разница расчетного давления паров и табличного значения минимальна $\Delta_{min} = \rho'_n - \rho_i$. Шаг $\Delta P_i = 0,001$ МПа. На следующем временном шаге в паровом пространстве устанавливается новое давление: $P'_n = P_i$

После того, как вычислено новое значение давления в паровом пространстве – происходит присвоение переменным новых значений. Если произошло испарение жидкости, $\Delta g_{жс} > 0$, то энтальпии жидкости присваивается значение энтальпии насыщенной жидкости: $h_{жс} = h'$. Давление пара устанавливается равным давлению, определенному по новому значению плотности пара $P_n = P'_n$

Для расчета изменения энтальпии паров используется уравнение энергии паровой фракции:

$$\rho_n \cdot \frac{\partial h_n}{\partial \tau} = \frac{\partial q_y}{\partial y} + q_v$$

Уравнение энергии паровой фракции вычисляет изменение энтальпии паров с учетом подвода теплоты из ОС и количество теплоты, перенесенное с парами жидкой фракции, проникающих в паровое пространство.

Используя метод замены производных конечными разностями, преобразуем уравнение к алгебраическому виду:

$$\rho_n \cdot \frac{h_n}{\Delta\tau} \approx \frac{\Delta q_y}{\Delta y} + q_v,$$

где Δq_y – это количество теплоты, внесенное насыщенными парами в паровое пространство: $\Delta q_y = \Delta g \cdot (h'' - h_n)$.

Ранее было указано, что большая толщина стенки и высокое качество контакта между жидкой фракцией и стенкой приводит к тому, что стенка сосуда выполняет функции экрана, т.е. жидкость отводит на себя все теплопритоки, проникающие сквозь изоляцию. Поэтому для паровой фазы принимается, что теплота от внутренних источников равна нулю и, соответственно, так как нет теплопритоков из ОС: $q_v = q_{oc} = 0$.

В нормативной документации приведена методика, по которой определяется уровень заполнения танка [9] по формуле:

$$Ll = Fl \cdot \frac{\rho_{min}}{\rho_{max}},$$

где Fl (*filling limit*) – максимальный уровень заполнения танка 98%,

ρ_{min} – минимальная плотность жидкой фракции СПГ (достигается при максимальном избыточном давлении паров СПГ), кг/м³;

ρ_{max} – максимальная плотность жидкой фракции (в момент загрузки, при нулевом избыточном давлении паров СПГ), кг/м³.

Для моделируемого резервуара уровень заполнения составляет:

$$Fl = 0,98 \cdot \frac{371,75}{423,73} = 0,86.$$

При перевозке СПГ на большие расстояния загрузка до фиксированного уровня не рациональна. В случае аномально длительного перехода возрастает вероятность перехода в экстремальный режим работы емкости. А в случае короткого перехода емкость можно было бы использовать в большей мере.

Однако подобный подход с фиксированным уровнем заполнения танка не является оптимальным. В случае длительного перехода – давление превысит максимально допустимое и часть пара будет сброшена, а в случае короткого перехода – давление не успеет достигнуть максимально допустимого, что означает, что за рейс могло быть перевезено большее количество СПГ.

При каботажной навигации в Норвегии, доставке СПГ по Рейну и другие, расстояния перегонов приблизительно одинаковы [10-11]. В России с её неравномерной плотностью населения и большим удалением населенных пунктов друг от друга необходимо использовать адаптированную технологию транспортирования СПГ.

В численном эксперименте моделируется перевозка СПГ по трем направлениям: навигация по Обской и Тазовской губе, по Енисею от Дудинки до Енисейска и по Лене от Ленска до Тикси, а также притоке Лены – Алдану до Усть-Маи. Выбраны несколько перегонов различной продолжительности, для которых оптимальным является разный уровень начального заполнения танка.

Продолжительность переходов определяется с учетом максимальной скорости судов типа «Ленанефть 621», которая составляет 19 узлов [12]. Рассматриваемые перегоны, расстояния между конечными точками и суммарное время прохождения приведены в таблице 1.

Таблица 1. Рассматриваемые перегоны
Table 1. Considered routes

Перегон Distillation	Расстояние, км Distance, km	Время прохождения, ч Travel time, h
Якутск – Тикси Yakutsk – Tiksi	1631,1	94,4
Дудинка – Новоназимова Dudinka – Novonazimovo	1357,4	82,5
Дудинка – Бор Dudinka – Bor	1093,1	65,2
Якутск – Жиганск Yakutsk – Zhigansk	769,2	44,5
Сабетта – Панаевск Sabetta – Panaevsk	615,4	35,6
Дудинка – Игарка Dudinka – Igarka	252,9	15,4
Сабетта – Сёяха Sabetta – Syoyakha	125,3	7,6

Изменяя начальный уровень заполнения танка, можно вычислить время, за которое давление паров повысится до максимально допустимого уровня.

Начальное давление СПГ принято равным 0,105 МПа. Увеличение степени начального заполнения танка жидкостью от 0,7 до 0,925 привело к уменьшению продолжительности бездренажного транспортирования СПГ от 126,7 до 38 часов. График зависимости времени бездренажного хранения от первоначального уровня заполнения танка представлен на рис. 2.

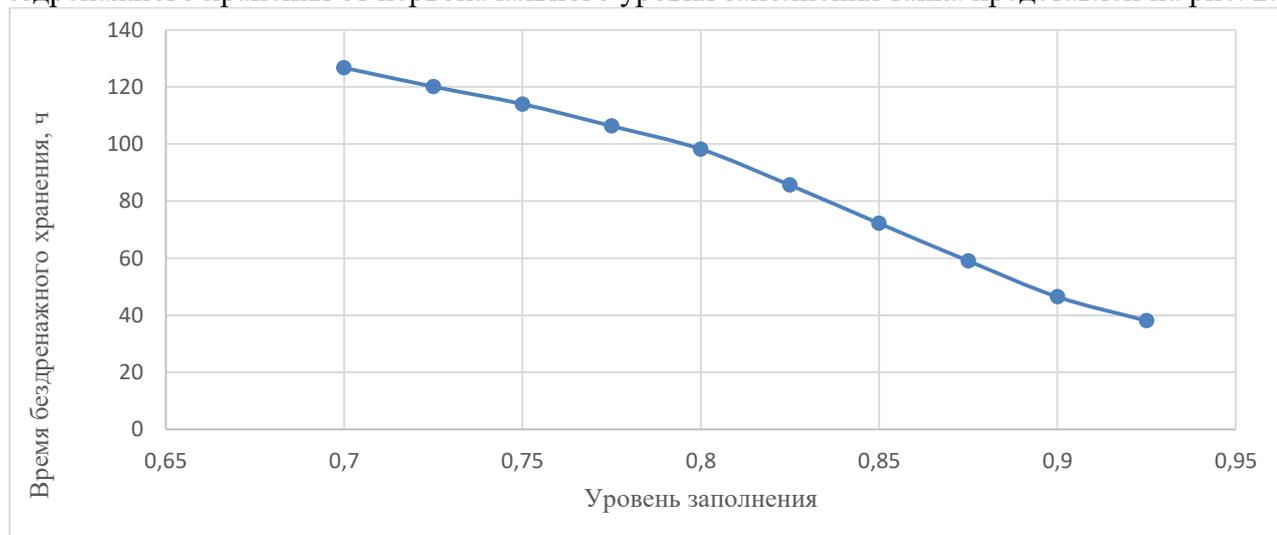


Рис. 2. График зависимости времени бездренажного хранения от первоначального уровня заполнения танка

Fig. 2. Graph of dependence of the time of non-drainage storage on the initial filling level of the tank

Вывод. При увеличении давления паров СПГ внутри танка растет температура насыщения жидкой фракции и снижается ее плотность. Из-за этого доля объема занятого жидкостью постоянно возрастает, уменьшая паровое пространство емкости. Увеличение массы паров СПГ в сочетании с уменьшением объема паровой зоны повышают темп роста давления.

При оптимизации начального уровня заполнения танка определено количество СПГ, которое будет вынуждено сброшено в виде пара на длинных перегонах. Вычислено дополнительное количество СПГ, которое можно перевести на коротких перегонах.

В табл. 2 приведено сравнение оптимизированной транспортной модели и модели, принятой сейчас.

Таблица 2. Результаты вычислительного эксперимента по моделированию перевозки сжиженного природного газа речным танкером
Table 2. Results of a computational experiment on modeling the transportation of liquefied natural gas (LNG) by river tanker

Рассматриваемый перегон Ferry in question	Время транспортирования, час Transportation time, hour	Оптимальный уровень начального заполнения жидкостью Optimum initial liquid fill level	Масса возможных потерь СПГ из-за превышения давления, т Mass of possible LNG losses due to overpressure, t	Дополнительная масса СПГ, т Additional mass of LNG, t
Якутск – Тикси Yakutsk – Tiksi	94,4	0,807	2,062	–
Дудинка – Ново-назимово Dudinka – Novonazimovo	82,5	0,832	2,062	–
Дудинка – Бор Dudinka – Bor	65,2	0,860	–	–
Якутск – Жиганск Yakutsk – Zhigansk	44,5	0,886	–	31,2
Сабетта – Панаевск Sabetta – Panaevsk	35,6	0,896	–	43,2
Дудинка – Игарка Dudinka – Igarka	15,4	0,915	–	66
Сабетта – Сёяха Sabetta – Syoyakha	7,6	0,922	–	74,4

Для больших расстояний экономическая эффективность определяется по массе предотвращенных потерь СПГ. Для коротких перегонов – экономический эффект определяется дополнительной массой перевезенного СПГ на километр.

Оптимизация режима эксплуатации танков типа «С» возможна для случаев с любой толщиной изоляционного слоя. При выполнении подобных расчетов можно составлять таблицы оптимального заполнения для перегонов любой дальности.

По сравнению с методикой, когда уровень заполнения принимается по плотности СПГ в момент отгрузки и плотности при максимальном избыточном давлении, – в оптимизированной методике наблюдается положительный экономический эффект.

Библиографический список:

1. Иванов Л.В., Баранов А.Ю., Плужникова Перспективы использования водного транспорта СПГ для автономной газификации отдаленных регионов // Газовая промышленность. 2020, №2(796). С. 52-58;
2. Баранов А. Ю., Иванов Л. В., Анализ конструкционных особенностей систем хранения груза для танков для модернизации проекта речного танкера класса река-море // Морской Вестник. 2019, №3(71). с 18-21;
3. Каталог продукции компании Woojo Hightech CO., LTD URL:<http://woojohightech.com/pdf/wojo-catalogue.pdf> (дата обращения 08.06.2020);
4. МАРПОЛ 73/78 Приложение I к конвенции «Правила предотвращения загрязнения нефтью» URL: <http://docs.cntd.ru/document/499014769> (дата обращения 08.06.2020);
5. Международный кодекс постройки и оборудования судов, перевозящих сжиженные газы наливом (IGC Code);
6. Архаров А.М. Криогенные системы: основы проектирования аппаратов, установок и систем. - М.: Машиностроение, 1999. 556-562 с.
7. Баранов А.Ю., Валентинова К.А., Иванов Л.В. Моделирование испарения сжиженного природного газа в мобильных резервуарах [Modeling of liquefied natural gas evaporation on mobile reservoirs] // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики [Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics]. 2020. Т. 20. №4(128). С. 595-602.
8. Яковлев Е.И. Тепловые режимы хранилищ сжиженных газов. - СПб.: Недра, 1992. 182 с.

9. DNVGL-CG-0135 Liquefied gas carriers with independent cylindrical tanks of type C – 2016 URL: <https://rules.dnvgl.com/docs/pdf/DNVGL/CG/2016-02/DNVGL-CG-0135.pdf> (дата обращения 08.06.2020);
10. Egil Rensvik Distribution and use of LNG for a cleaner environment // Presentation on the Network LNG Norway with GO LNG Interreg Project – Bergen, Norway – 2017 URL: http://www.lngcluster.eu/files/Main/files/Egil%20Rensvik_Network%20LNG%20Norway.pdf (дата обращения 08.06.2020);
11. Lucia Karpatyova LNG Masterplan in a nutshell. Project overview presentation – 2015 URL: http://lngmasterplan.eu/images/2015-12-16_04_LNG_MP_FE_Project_overview_Lucia.Karpatyova.pdf (дата обращения 08.06.2020);
12. Спецификация Ленанефть 621 URL: <https://russrivership.ru/public/files/doc357.pdf> (дата обращения 08.06.2020).
13. Soumya Chakraborty - Understanding the design of liquified gas carriers - Naval Architecture, 2019.- URL: <https://www.marineinsight.com/navalarchitecture/understandingdesignliquefiedgascarriers/>(дата обращения 09.06.2019)
14. International safety guide for inland navigation tankbarges and terminals. (ISGINTT).- Chapter 33: Types of gas carriers,2010, 14 с. 21
15. LNG vessel construction - Advantages of Moss Rosenberg technology- URL: <http://www.liquefiedgascarrier.com/mossrosenbergcontainmentsystem.html> (дата обращения 09.06.2019)
16. IHI: What is SPB tank?URL: https://www.ihi.co.jp/offshore/whatisspb_e.htm (дата обращения 09.06.2019)
17. Wursig G.M. LNG fuel tank: benefits and challenges - Managing risk DNV, 2012. 27 с. 21
18. Fleet List Small Scale LNG Carriers - Updated URL: <https://smalllng.com/fleetlistsmallscalelngcarriersupdated/>(дата обращения 09.06.2019)
19. Karistios Leonidas. Smallscale LNG ships: a report into the commercial drivers and technical requirements for seaborne smallscale supply - Southampton, UK: Lloyd's Register Marine, 2018.-32 с.
20. URL: <https://www.fkab.com/wpcontent/uploads/sites/3/CoraliusLNG.pdf> (дата обращения 09.06.2019) Coralius: 5800 m3 LNG Bunker and feeder vessel.

References:

1. Ivanov L.V., Baranov A.YU., Pluzhnikova Perspektivy ispol'zovaniya vodnogo transporta SPG dlya avtonomnoy gazifikatsii otдалennykh regionov // Gazovaya promyshlennost'. 2020, №2(796). S. 52-58; [Ivanov LV, Baranov A.Yu., Pluzhnikova Prospects for the use of LNG water transport for autonomous gasification of remote regions // Gas Industry. 2020, No. 2 (796). 52-58; (In Russ)]
2. Baranov A. YU., Ivanov L. V., Analiz konstruksionnykh osobennostey sistem khraneniya gruzha dlya tankov dlya modernizatsii proyekta rechnogo tankera klassa reka-more // Morskoy Vestnik. 2019, №3(71). s 18-21; [Baranov A. Yu., Ivanov L. V., Analysis of the structural features of cargo storage systems for tanks to modernize the project of a river-sea tanker // Marine Bulletin - 2019, No. 3 (71). from 18-21. (In Russ)]
3. Katalog produktov kompanii Woojo Hightech CO., LTD URL:<http://wojohightech.com/pdf/wojo-catalogue.pdf> (data obrashcheniya 08.06.2020)[Product catalog of Woojo Hightech CO., LTD URL: <http://wojohightech.com/pdf/wojo-catalogue.pdf> (access date 06/08/2020) (In Russ)]
4. MARPOL 73/78 Prilozheniye I k konventsii «Pravila predotvrashcheniya zagryazneniya neft'yu» URL: <http://docs.cntd.ru/document/499014769> (data obrashcheniya 08.06.2020)[MARPOL 73/78 Appendix I to the Convention “Rules for the Prevention of Oil Pollution” URL: <http://docs.cntd.ru/document/499014769> (date of access 08.06.2020 (In Russ)]
5. Mezhdunarodnyy kodeks postroyki i oborudovaniya sudov, perevozyashchikh szhizhennyye gazy nalivom (IGC Code) [International Code for the Construction and Equipment of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk (IGC Code) (In Russ)]
6. Arkharov A.M. Kriogennyye sistemy: osnovy proyektirovaniya apparatov, ustanovok i sistem. - M.: Mashinostroyeniye, 1999. 556-562 s. [Arkharov A.M. Cryogenic systems: the basics of designing devices, installations and systems. - M.: Mechanical Engineering, 1999 . pp. 556-562 (In Russ)]
7. Baranov A.YU., Valentinova K.A., Ivanov L.V. Modelirovaniye ispareniiya szhizhennogo prirodnogo gaza v mobil'nykh rezervuarakh [Baranov A.Yu., Valentinova K.A., Ivanov L.V. Modeling of liquefied natural gas evaporation on mobile reservoirs // Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics. 2020. T. 20. No. 4 (128). pp. 595-602. (In Russ)]
8. Yakovlev Ye.I. Teplovyye rezhimy khranilishch szhizhennykh gazov. SPb.: Nedra, 1992. 182 s.[Yakovlev E.I. Thermal regimes of liquefied gas storage facilities. SPb.: Nedra, 1992. 182 p. (In Russ)]
9. DNVGL-CG-0135 Liquefied gas carriers with independent cylindrical tanks of type C - 2016 URL: <https://rules.dnvgl.com/docs/pdf/DNVGL/CG/2016-02/DNVGL-CG-0135.pdf> (date of treatment 06/08/2020);
10. Egil Rensvik Distribution and use of LNG for a cleaner environment // Presentation on the Network LNG Norway with GO LNG Interreg Project - Bergen, Norway - 2017 URL: http://www.lngcluster.eu/files/Main/files/Egil%20Rensvik_Network%20LNG%20Norway.pdf (date of access 06/08/2020);

11. Lucia Karpatyova LNG Masterplan in a nutshell. Project overview presentation - 2015 URL: http://lngmasterplan.eu/images/2015-12-16_04_LNG_MP_FE_Project_overview_Lucia.Karpatyova.pdf (access date 06/08/2020);
12. Spetsifikatsiya Lenaneft' 621 URL: <https://russrivership.ru/public/files/doc357.pdf> (data obrashcheniya 08.06.2020 [Lenaneft' 621 specification URL: <https://russrivership.ru/public/files/doc357.pdf> (date of access 06/08/2020). (In Russ)]
13. Soumya Chakraborty - Understanding the design of liquified gas carriers - Naval Architecture, 2019.- URL: <https://www.marineinsight.com/navalarchitecture/understandingdesignliquefiedgascarriers/>(дата обращения 09.06.2019)
14. International safety guide for inland navigation tankbarges and terminals. (ISGINTT).- Chapter 33: Types of gas carriers,2010, 14 с. 21
15. LNG vessel construction - Advantages of Moss Rosenberg technology- URL: <http://www.liquefiedgascarrier.com/mossrosenbergcontainmentsystem.html> (дата обращения 09.06.2019)
16. IHI: What is SPB tank?- URL: https://www.ihi.co.jp/offshore/whatisspb_e.htm (дата обращения 09.06.2019)
17. Wursig G.M. LNG fuel tank: benefits and challenges - Managing risk DNV, 2012.-27 с. 21
18. Fleet List Small Scale LNG Carriers - Updated URL: <https://smallng.com/fleetlistsmallscalelngcarriersupdated/>(дата обращения 09.06.2019)
19. Karistios Leonidas. Smallscale LNG ships: a report into the commercial drivers and technical requirements for seaborne smallscale supply - Southampton, UK: Lloyd's Register Marine, 2018.-32 с.
20. URL: <https://www.fkab.com/wpcontent/uploads/sites/3/CoraliusLNG.pdf> (дата обращения 09.06.2019) Coralius: 5800 m3 LNG Bunker and feeder vessel.

Сведения об авторах:

Баранов Александр Юрьевич, доктор технических наук, профессор, факультет низкотемпературной энергетики, e-mail: abaranov@corp.ifmo.ru

Иванов Лев Владимирович, аспирант, факультет низкотемпературной энергетики, e-mail: levladiv@mail.ru

Андреев Анатолий Михайлович, аспирант, факультет низкотемпературной энергетики, e-mail: amandreev@itmo.ru

Information about authors:

Alexander Yu. Baranov, Dr. Sci. (Technical), Prof., Faculty of Low-Temperature Energy, e-mail: abaranov@corp.ifmo.ru

Lev V. Ivanov, Postgraduate Student, Faculty of Low-Temperature Energy, e-mail: levladiv@mail.ru

Anatoly M. Andreev, Postgraduate Student, Faculty of Low-Temperature Energy, e-mail: amandreev@itmo.ru

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 21.12.2020.

Принята в печать 19.01.2021.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 21.12.2020.

Accepted for publication 19.01.2021.

Для цитирования: Л.В. Галимова, Д.З. Байрамов. Комплексный анализ абсорбционной бромистолитиевой холодильной машины в составе энергосистемы ПГУ-110 И АБХМ. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2021; 48 (1): 18-27. DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-1-18-27

For citation: L.V. Galimova, D.Z. Bayramov. Comprehensive analysis of the absorption lithium bromide refrigerating machine as part of the CCGT-110 and ALBRM power system. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2021; 48 (1): 18-27. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-1-18-27

**ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ
POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL MECHANICAL ENGINEERING**

УДК 621.362 УДК 621.56

DOI: 10.21822/2073-6185-2021-48-1-18-27

**КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ АБСОРБЦИОННОЙ БРОМИСТОЛИТИЕВОЙ ХОЛОДИЛЬНОЙ
МАШИНЫ В СОСТАВЕ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ ПГУ-110 И АБХМ**

Л.В. Галимова, Д.З. Байрамов

*Астраханский государственный технический университет,
414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 16, Россия*

Резюме. Цель. Применение абсорбционной бромистолитиевой холодильной машины (АБХМ) для охлаждения циклового воздуха перед газотурбинной установкой (ГТУ) парогазовой турбины (ПГУ) в условиях жаркого климата доказало свою эффективность. Актуальным является поддержание проектных значений, для чего проводится постоянный мониторинг и, при необходимости корректируются параметры работы. Целью данной работы является проведение комплексного анализа АБХМ в составе энергосберегающей системы. **Метод.** В качестве методов исследования принят метод энергетического и эксергетического анализа по результатам натурного производственного эксперимента. **Результат.** Энергетический анализ проводился с использованием диаграммы $\xi - i$ для раствора бромистого лития с водой. По результатам энергетического анализа выявлены отклонения в работе АБХМ, а эксергетический анализ подтвердил эти отклонения. **Вывод.** Проведенный анализ работы АБХМ позволил выявить отклонения в работе и причины, их вызывающие.

Ключевые слова: энергосбережение, теплоиспользующая холодильная машина, режимы работы, тепловой расчёт, эксергия

**COMPREHENSIVE ANALYSIS OF THE ABSORPTION LITHIUM BROMIDE REFRIGERATING
MACHINE AS PART OF THE CCGT-110 AND ALBRM POWER SYSTEM**

L.V. Galimova, D.Z. Bayramov

*Astrakhan State Technical University,
16 St., Astrakhan, Tatishcheva 414056, Russia*

Abstract. Objective. The use of an absorption lithium bromide refrigerating machine for cooling the cycle air before the gas turbine unit of a combined-cycle gas turbine in a hot climate has proven its effectiveness. It is essential to maintain the design values for which constant monitoring is carried out and the operation parameters are adjusted. The objective of this work is to conduct a comprehensive analysis of the absorption lithium bromide refrigerating machine as part of an energy-saving system. **Methods.** As a research method, the method of energy and exergetic analysis based on the results of a full-scale production experiment was adopted. **Results.** The energy analysis was performed using the ξ - i diagram for a solution of lithium bromide with water. According to the energy analysis results, deviations in the work of the absorption lithium bromide refrigerating machine were revealed, and the exergetic analysis confirmed these deviations. **Conclusion.** The analysis of the operation of the absorption lithium bromide refrigerating machine allowed identifying deviations in work and their causes.

Keywords: energy saving, heat-using refrigeration machine, operating modes, thermal calculation, exergy

Введение. Абсорбционные холодильные машины, используемые для охлаждения циклового воздуха перед ПГУ, позволяют повысить эффективность в жаркий период времени [7,10,13,16]. Поддержание проектных значений работы АБХМ является актуальной задачей в действующих системах, для чего проводится постоянный мониторинг АБХМ, фиксируются параметры работы и при необходимости корректируются. Однако не всегда это возможно по ряду причин.

Постановка задачи. Целью работы является проведение комплексного анализа работы АБХМ в составе энергосберегающей системы для выявления возможных отклонений и причин, их вызывающих.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи: проведение натурно-производственного эксперимента действующей системы; проведение энергетического и эксергетического анализа работы АБХМ в составе энергосистемы; анализ результатов энергетического и эксергетического расчета.

Методы исследования. Объектом исследования является энергосберегающая система на базе ПГУ-110 и АБХМ компании ООО «ЛУКОЙЛ-Астраханьэнерго», расположенной в городе Астрахань.

Принципиальная схема системы представлена на рис. 1.

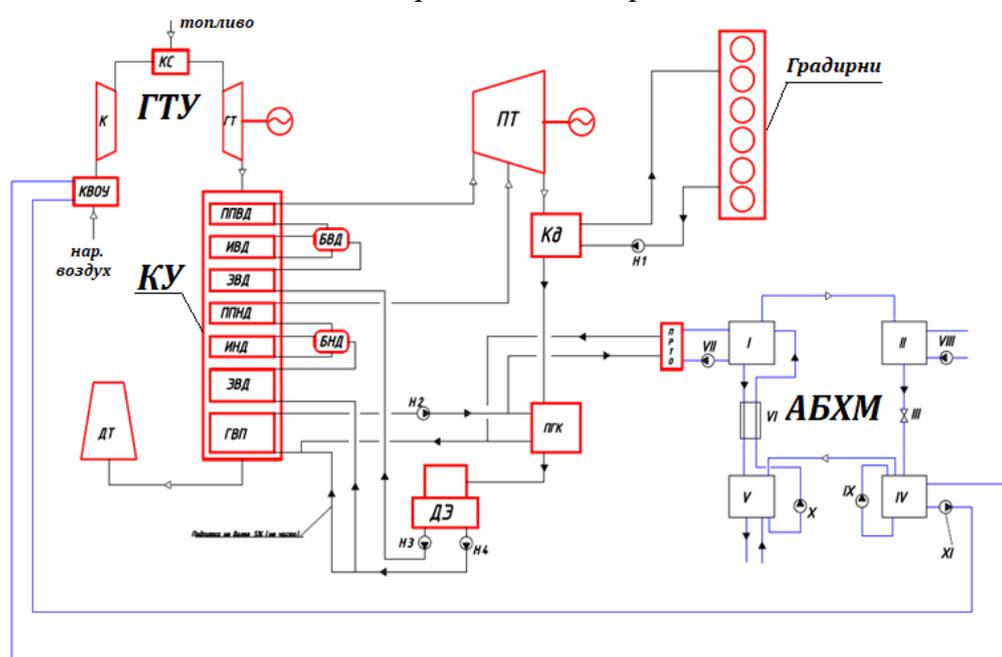


Рис. 1. Принципиальная схема энергосберегающей системы на базе ПГУ-110 и АБХМ:
ГТУ – газотурбинная установка, КУ – котел-утилизатор, АБХМ – абсорбционная бромистолитиевая
холодильная машина, КВОУ – комбинированная воздухоочистительная установка
Fig. 1. Schematic diagram of an energy-saving system based on CCGT-110 and ABHM:
GTU – gas turbine unit, HR -heat recovery boiler, ABCM-absorption lithium bromide refrigerating machine,
AFCS -air filtering and conditioning system

Принцип работы парогазовой установки описан в [9, 15].

Основными энергообразующими элементами, которые связывают между собой АБХМ и ПГУ являются двухконтурный котел-утилизатор, который обеспечивает тепловую нагрузку на генератор АБХМ, и комбинированная воздухоочистительная установка (КВОУ).

Система является действующей, поэтому для сбора данных был проведен натурный эксперимент.

В табл. 1 представлены результаты натурного эксперимента за 2019 год. Энергетический расчет абсорбционной холодильной машины проводился по известной методике [2, 3, 5, 8].

Результаты расчета представлены в табл. 2.

Таблица 1. Результаты натурного эксперимента за 2019 год
Table 1. Results of the field experiment for 2019

Май May	Температура наружного воздуха, °С Temperature outside air, °C	Относительная влажность наружного воздуха,% Relative outdoor air humidity,%	Температура греющего источника на входе в генератор, °С Heating source temperature at the generator entrance, °C	Температура греющего источника на выходе из генератора, °С Temperature heating source at the generator outlet, °C	Температура охлаждающей среды, °С Temperature cooling medium, °C	Температура тосола на входе в испаритель, °С Antifreeze temperature at the inlet to the evaporator, C	Температура тосола на вы- ходе из испа- рителя, °С Antifreeze temperature at the outlet of the evaporator, °C
Июнь June	26	49	84,3	78,3	28,4	12,4	9,5
Июль July	32,5	52	85,3	80,6	28,3	11,6	9,1
Август August	31	50	84,6	79,7	29,3	10,4	7,5
Май May	32	51	89,7	84,4	29,1	10,6	7,3

Таблица 2. Результаты энергетического расчета по данным 2019 года
Table 2. Results of the energy calculation according to the data of 2019

Наименование Name	ед. изм. units rev.	Май May	Июнь June	Июль July	Август August	Проект Project
Температура конденсации Condensing temperature	°С	36,4	36,4	37,3	37,1	35
Температура кипения Boiling temperature	°С	4,5	6,1	5,5	3,3	2
Концентрация слабого раствора Weak solution concentration	%	52,3	52,4	51,7	52,5	53,4
Концентрация крепкого раствора Strong solution concentration	%	56,2	56,4	57,1	57,1	60,5
Кратность циркуляции Circulation rate		14,4	13,2	12,8	12,4	9,8
Расход холодильного агента Refrigerant consumption	кг/с	1,1	0,9	0,9	1	1,5
Интервал дегазации Degassing interval	%	4	4,2	4,4	4,4	6,1
Уд. тепловая нагрузка на испаритель Ud. heat load on the evaporator	кДж/кг	2372	2365	2369	2370	2378
Уд. тепловая нагрузка на конденсатор Ud. thermal load on the capacitor	кДж/кг	2485	2475	2480	2484	2499
Уд. тепловая нагрузка на абсорбер Ud. heat load on the absorber	кДж/кг	3362	3296	3272	3249	3110
Уд. тепловая нагрузка на генератор Ud. generator heat load	кДж/кг	3474	3405	3383	3364	3231
Полная тепловая нагрузка на испаритель Total heat load on the evaporator	кВт	2609	2128	2132	2370	3567
Полная тепловая нагрузка на конденсатор Total thermal load on the capacitor	кВт	2734	2228	2232	2484	3748
Полная тепловая нагрузка на абсорбер Total heat load on the absorber	кВт	3698	2966	2945	3249	4665
Полная тепловая нагрузка на генератор Total heat load on the generator	кВт	3821	3064	3045	3364	4846
Тепловой коэффициент Heat coefficient		0,68	0,69	0,7	0,7	0,75

Для сравнения результатов проведенного энергетического расчета построена гистограмма, представленная на рис. 2–7.

Полная нагрузка на генератор АБХМ

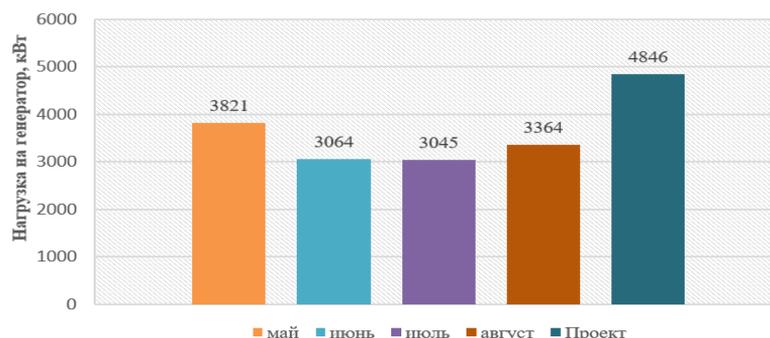


Рис.2. Полная тепловая нагрузка на генератор АБХМ

Fig. 2. Total heat load on the ABHM generator

Тепловую нагрузку на генератор АБХМ обеспечивает контур газовойводяного подогревателя (ГВП) котла-утилизатора (КУ). В период 2018 года проводилась модернизация КУ, а именно монтаж дополнительных перегородок в контурах пара высокого и низкого давления, что позволило повысить паропроизводительность на паровую турбину, но при этом значительно снизилась тепловая нагрузка на контур ГВП. Все это привело к снижению тепловой нагрузки на генератор АБХМ.

Полная нагрузка на конденсатор АБХМ

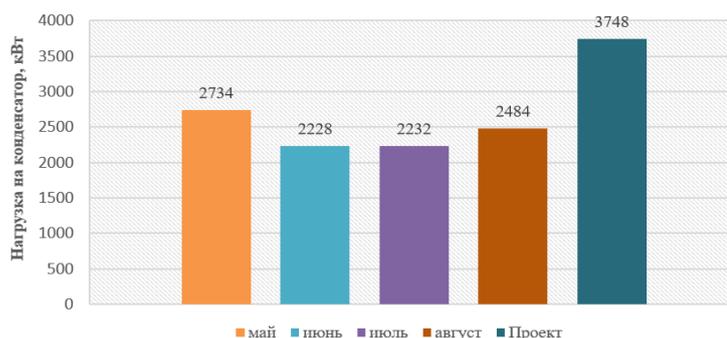


Рис. 3. Полная тепловая нагрузка на конденсатор АБХМ

Fig. 3. Total thermal load on the ABHM capacitor

Полная тепловая нагрузка на конденсатор зависит от давления конденсации и расхода холодильного агента. При уменьшении тепловой нагрузки на генератор уменьшилась выработка пара холодильного агента, что привело к уменьшению тепловой нагрузки на конденсатор.

Полная нагрузка на испаритель АБХМ

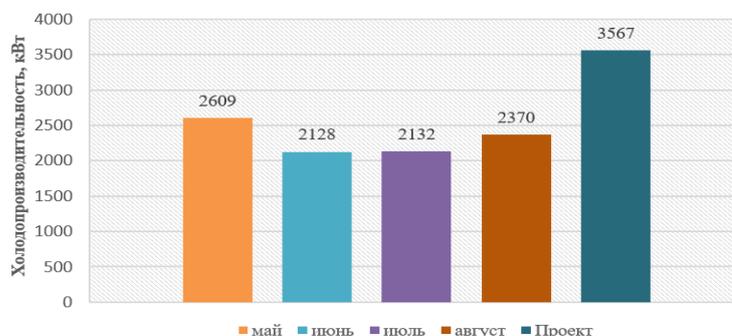


Рис. 4. Полная тепловая нагрузка на испаритель АБХМ

Fig. 4. Total heat load on the ABHM evaporator

Холодопроизводительность испарителя зависит от температуры и расхода теплоносителя, расхода и температуры испарения холодильного агента. С уменьшением производительности пара в генераторе уменьшился расход и в испаритель.

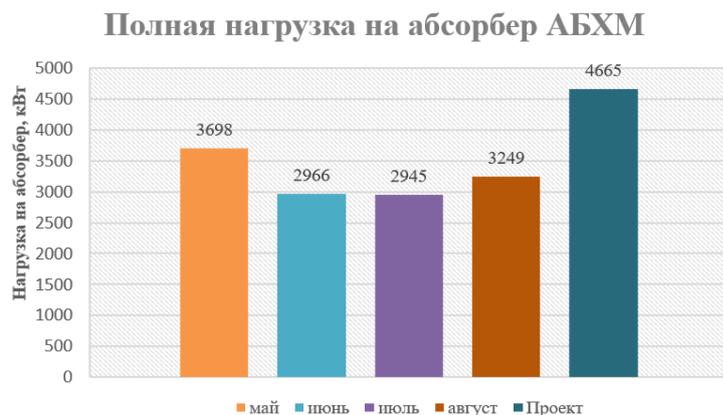


Рис. 5. Полная тепловая нагрузка на абсорбер АБХМ
Fig. 5. Total heat load on the ABCM absorber

Уменьшение тепловой нагрузки на генератор привело к уменьшению концентрации крепкого раствора перед абсорбером. Уменьшение расхода холодильного агента наряду с уменьшением концентрации крепкого раствора привело к снижению полной тепловой нагрузки на абсорбер, что, в конечном счёте, снизило интервал дегазации (рис. 6).

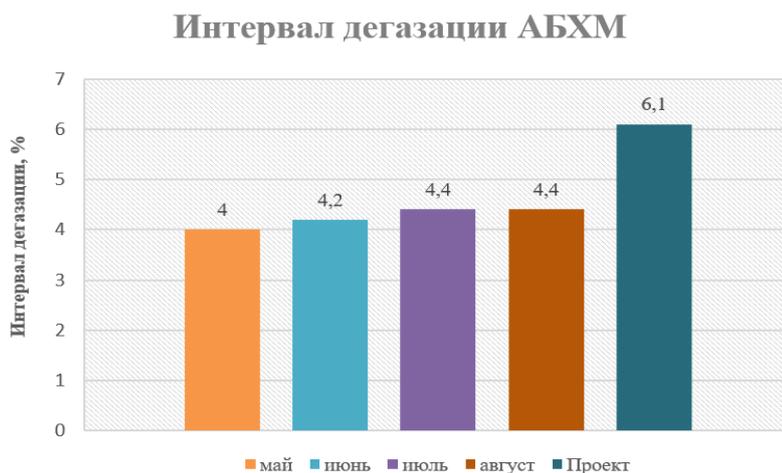


Рис. 6. Интервал дегазации
Fig. 6. Degassing interval

На рис.7 представлена сравнительная гистограмма теплового коэффициента, который позволяет оценить эффективность работы АБХМ.

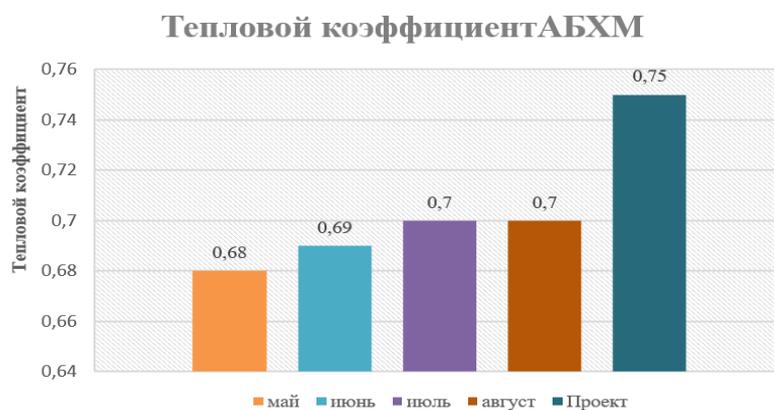


Рис.7. Тепловой коэффициент
Fig. 7. Thermal coefficient

Как можно видеть по гистограмме, наблюдается снижение действительного теплового коэффициента в сравнении с проектным. Характер изменения объясняется одновременным снижением тепловых нагрузок на генератор и на испаритель. Проведенный энергетический анализ позволяет количественно оценить эффективность работы АБХМ. Для качественной оценки работы АБХМ целесообразно применять термодинамический анализ. Для данной работы принят эксергетический метод, как наиболее подходящий для анализа теплоиспользующих холодильных машин [1, 20].

В рамках эксергетического анализа в данной работе определялись значения потоков эксергии, а затем строились эксергетические балансы каждого элемента и всей системы в целом по известной методике [4,6,11,17,18]. Результаты эксергетического анализа представлены в табл. 3, 4.

Таблица 3. Результаты эксергетического анализа АБХМ
Table 3. Results of exergetic analysis of ABCM

Элемент АБХМ Element ABHM	Май May			Июнь June			Июль July			Август August		
	Ed	yd	e	Ed	yd	e	Ed	yd	e	Ed	yd	e
	кВт	%	%	кВт	%	%	кВт	%	%	кВт	%	%
Генератор Generator	79,3	14,3	87	74,4	16,3	83,2	72	15,8	84,2	98,5	18,4	81,6
Абсорбер Absorber	58,8	10,6	42	43,8	9,6	44,3	35,1	7,7	41,6	43	8	42,3
Конденсатор Capacitor	76,6	13,8	29,1	75,3	16,5	31,1	59,8	13,1	29,4	68,5	12,8	27,2
Испаритель Evaporator	175,4	31,6	78,6	105	23	75,4	128	24	81,5	145	27,1	79,2
РВ РВ	6,1	1,1	65	7,8	1,7	31,3	7,3	1,6	34	9,1	1,7	35
ТО растворов TO solutions	100,5	18,1	58	73	16	61	75,3	16,5	63,2	91	17	64

Таблица 4. Сравнение результатов с проектом для системы в целом
Table 4. Comparison of results with the project for the system as a whole

Месяц Month	Ef	Ep	$\sum Ed$	yd	e
	кВт	кВт	кВт	%	%
Май May	623	111	512	82,2	17,8
Проект Project	867	185	682	78,7	21,3
Июнь June	456	76,9	379,1	83,1	16,86
Проект Project	774	174	600	77,5	22,5
Июль July	456	78	378	82,9	17,11
Проект Project	787	165	622	79,0	21,0
Август August	535	79,9	455,1	85,1	14,93
Проект Project	774	174	600	77,5	22,5

На рис. 8 – 12 представлены гистограммы, в которых сравниваются результаты эксергетического анализа всей системы по результатам натурного эксперимента и проектным значениям.

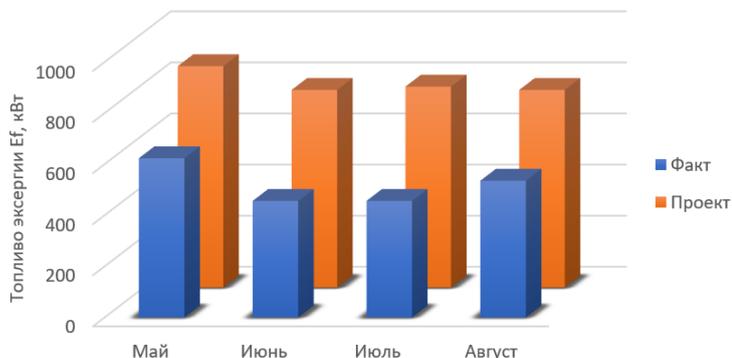


Рис.8. Топливо эксергии системы
Fig.8. Fuel of the exergy system

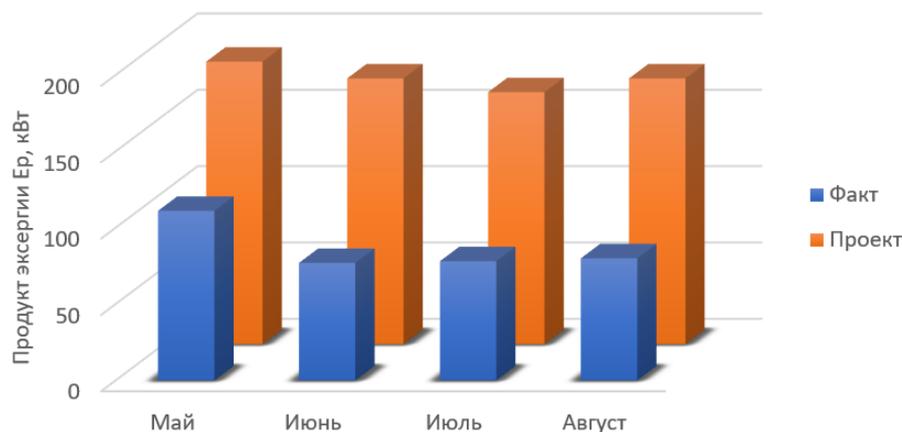


Рис.9. Продукт эксергии системы
Fig. 9. Exergy product of the system

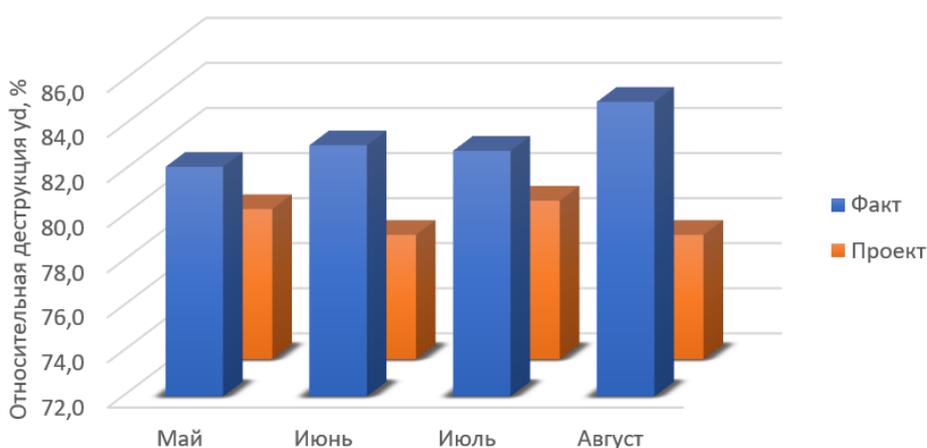


Рис.10. Относительная деструкция эксергии
Fig.10. Relative destruction of exergy

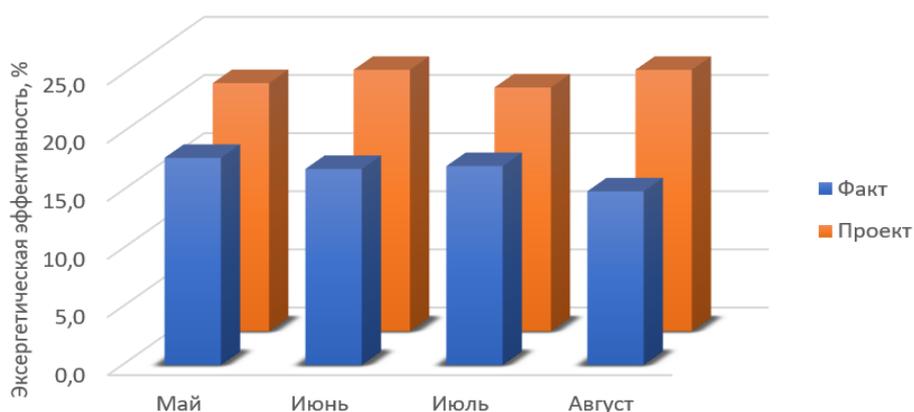


Рис. 11. Эксергетическая эффективность всей системы АБХМ
Fig. 11. Exergetic efficiency of the entire ABCM system

Для наглядности на рис. 12 представлена итоговая диаграмма распределения потоков и потерь эксергии.

Обсуждение результатов. Результаты эксергетического анализа подтверждают предположения. Снижение тепловой нагрузки на генератор, как основного источника энергии, приводит к снижению эксергии топлива системы, а снижение расхода холодильного агента привело к уменьшению эксергии продукта системы.

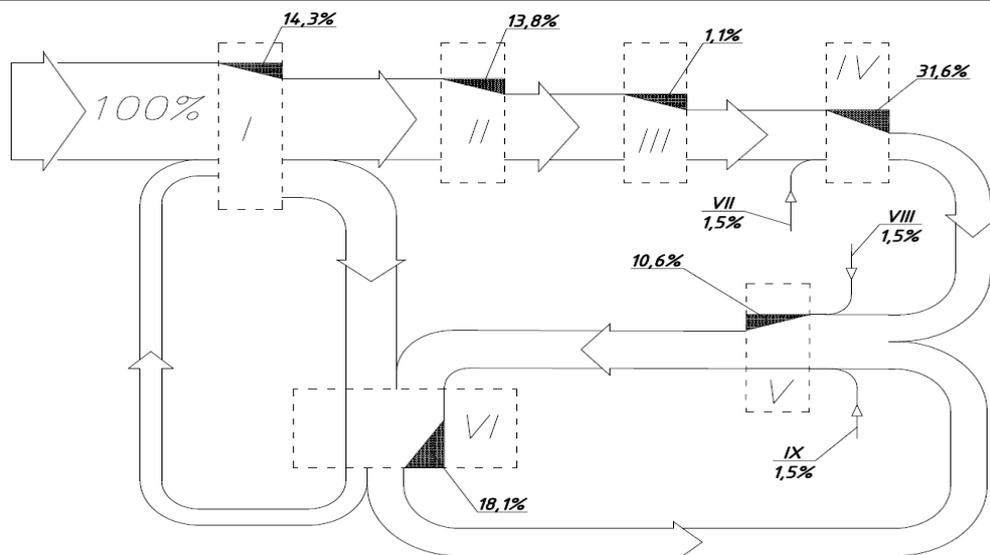


Рис. 12. Диаграмма потоков и потерь эксергии
Fig. 12. Exergy flow and loss diagram

Относительная деструкция эксергии показывает связь между деструкцией эксергии по отношению к эксергии топлива [12,14,19]. Увеличение относительной деструкции эксергии связано с ростом потерь давления в трубопроводах системы теплоносителя испарителя и греющего источника, что также можно видеть по результатам энергетического анализа.

Все эти отклонения приводят к снижению эксергетической эффективности системы в целом, как показано на рис. 11, что подтверждает результаты энергетического анализа, а именно снижение производительности АБХМ.

Результаты проведенного анализа позволили выявить отклонения в работе АБХМ относительно проектных данных. Нагрузка на генератор АБХМ снизилась в среднем на 31 %, что привело к снижению нагрузки на абсорбер на 31%, а на конденсатор и испаритель в среднем на 35 %.

Эксергетический анализ также подтвердил снижение производительности, а именно снижение эксергетической эффективности в среднем на 22,5 %.

Вывод. Проведенный энергетический анализ по результатам натурального эксперимента позволил выявить отклонения в работе АБХМ в составе энергосберегающей системы и установить их причины.

Эксергетический анализ подтвердил результаты энергетического анализа и позволил качественно оценить работу АБХМ. Результаты проведенного анализа в дальнейшем будут применены для проверки адекватности разрабатываемой имитационной модели.

Библиографический список:

1. Архаров А.М. Почему эксергетический вариант термодинамического анализа нерационален для исследования основных низкотемпературных систем // Холодильная техника. 2011. № 10. С. 8-12.
2. Бамбушек Е.М., Бухарин Н.Н., Герасимов Е.Д. и др. Тепловые и конструктивные расчеты холодильных машин / под общ. ред. Сакуна И.А. Л.: Машиностроение, 1987. 423 с.
3. Бараненко А.В., Бухарин Н.Н., Пекарев В.И., Тимофеевский Л.С. Холодильные машины. М.: Политехника, 2006. 944 с.
4. Бродянский В.М., Фратшер В., Михалек К., Эксергетический метод и его приложения. Под редакцией В.М. Бродянского. М.: Энергоатомиздат, 1988. 288 с.
5. Галимова Л.В. Абсорбционные холодильные машины и тепловые насосы. Издательство АГТУ, 1997. 226 с.
6. Галимова Л. В., Байрамов Д. З. Термодинамический анализ работы парогазовой установки в составе энергосберегающей системы на базе абсорбционной бромистолитиевой холодильной машины // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2020. Т. 4, № 4.С. 57–65. DOI: 10.25206/2588-0373-2020-4-4-57-65.

7. Дагодин Д. Л., Анохин А. Б., Латыпов Г. Г., Крыкин И. Н. Охлаждение циклового воздуха компрессора ПГУ-110 с помощью абсорбционных бромисто-литиевых холодильных машин // Газотурбинные технологии. 2014. № 10. С. 8-12.
8. Дзино А.А., Малинина О.С. Абсорбционные холодильные машины. СПб.: университет ИТМО, 2015. 68 с.
9. Зысин Л. В. Парогазовые и газотурбинные тепловые электростанции. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. 368 с.
10. Матюнин Д.Ю., Полуэктова Т.Ю., Анохин А.Б., Крыкин И.Н. Об итогах реализации проекта охлаждения циклового воздуха компрессора ГТУ ПГУ-110 с применением АБХМ // Газотурбинные технологии. 2015. Т. 135, № 8. С. 12-16.
11. Морозюк Л.И., Грудка Б.Г. Введение в эксергетический анализ абсорбционно-резорбционной холодильной машины // Холодильная техника и технология. 2017. Т. 51, № 1. С. 4-10. DOI: <http://dx.doi.org/10.15673/ret.v53i1.533>
12. Морозюк Т.В. Новый этап в развитии эксергетического анализа // Холодильная техника и технология. 2014. Т. 50, № 4. С. 13-17.
13. Радченко А. Н., Кантор С. А. Эффективность способов охлаждения воздуха на входе ГТУ компрессорных станций в зависимости от климатических условий // Авиационно-космическая техника и технология. 2015. № 1 (118). С. 95–98.
14. Театсаронис Д. Взаимодействие термодинамики и экономики для минимизации стоимости энергопреобразующей системы. Одесса: Студия «Негоциант», 2002. 152 с.
15. Цанев С. В., Буров В. Д., Ремезов А. Н. Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электрических станций. М.: Изд-во МЭИ, 2002. 584 с.
16. Цхяев А.Д., Кузьмина Т.Г., Использование АБХМ в системе охлаждения воздуха на входе в компрессор ГТУ // Турбины и дизели. 2015. сентябрь-октябрь. С. 10-13.
17. Шаргут Я. Эксергия [Текст]/ Шаргут Я., Петела Р. под редакцией В.М. Бродянского В.М. М.: Энергия, 1968. 288 с.
18. Morosuk T., Tsatsaronis G. A new approach to the exergy analysis of absorption refrigeration machines. Int. J. Energy. 2008 Sep 1; 33 (6). pp. 890-907. DOI: 10.1016/j.energy.2007.09.012
19. Panahizadeh, F., Hamzehei, M., Farzaneh-Gord, M. et al. Energy, exergy, economic analysis and optimization of single-effect absorption chiller network. J Therm Anal Calorim (2020). <https://doi.org/10.1007/s10973-020-09966-4>
20. Tenkeng, M., Wouagfack, P. and Tchinda, R. (2019) Exergy Analysis of a Double-Effect Solar Absorption Refrigeration System in Ngaoundere. World Journal of Engineering and Technology, 7, 158-174. DOI: 10.4236/wjet.2019.71011.

References:

1. Arkharov A.M. Pochemu eksergeticheskiy variant termodinamicheskogo analiza neratsionalen dlya issledovaniya osnovnykh nizkotemperaturnykh sistem // Kholodil'naya tekhnika. 2011. № 10. S. 8-12 [Arkharov A.M. Why the exergetic variant of thermodynamic analysis is irrational for the study of basic low-temperature systems. // Technical refrigeration. 2011. No. 10. pp. 8-12. (In Russ)]
2. Bambushek Ye.M., Bukharin N.N., Gerasimov Ye.D. i dr. Teplovyye i konstruktivnyye raschety kholodil'nykh mashin / pod obshch. red. Sakuna I.A. L.: Mashinostroyeniye, 1987. 423 s. [Bambushek E. M., Bukharin N. N., Gerasimov E. D., and others. Thermal and structural calculations of refrigerating machines / ed. Sakun I. A.-L.: mechanical engineering, 1987. 423 p. (In Russ)]
3. Baranenko A.V., Bukharin N.N., Pekarev V.I., Timofeyevskiy L.S. Kholodil'nyye mashiny. M.: Politekhnik, 2006. 944 s [Baranenko A.V., Bukharin N. N., Pekarev V. I., Timofeevsky L. S. Refrigerating machines. – M.: University Of Technology, 2006. 944 p. (In Russ)]
4. Brodyanskiy V.M., Fratscher V., Mikhalek K., Eksergeticheskiy metod i yego prilozheniya. Pod redaktsiyey V.M. Brodyanskogo. M.: Energoatomizdat, 1988. 288 s. [Brodyansky V. M., Fratscher V., Mikhalek K., Exergetic method and its applications. Edited by V. M. Brodyansky. - M.: Energoatomizdat, 1988. 288 p. (In Russ)]
5. Galimova L.V. Absorbtsionnyye kholodil'nyye mashiny i teplovyye nasosy. Izdatel'stvo AGTU, 1997. 226 s. [Galimova L. V. Absorption refrigerating machines and heat pumps. - AGTU publishing house, 1997. – 226 p. (In Russ)]
6. Galimova L. V., Bayramov D. Z. Termodinamicheskii analiz raboty parogazovoy ustanovki v sostave energosberegayushchey sistemy na baze absorbtsionnoy bromistolitiyevoy kholodil'noy mashiny // Omskiy nauchnyy vestnik. Ser. Aviatcionno-raketnoye i energeticheskoye mashinostroyeniye. 2020. Т. 4, № 4. S. 57–65. DOI: 10.25206/2588-0373-2020-4-4-57-65. [Galimova L. V., Bairamov D. Z. Thermodynamic analysis of combined cycle plant operation as part of an energy-saving system based on an absorption bromide-lithium refrigerating machine // Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering. 2020. Vol. 4, no. 4. pp. 57–65. DOI: 10.25206/2588-0373-2020-4-4-57-65. (In Russ)]
7. Dagodin D. L., Anokhin A. B., Latypov G. G., Krykin I. N. Okhlazhdeniye tsiklovogo vozdukhа kompressora PGU-110 s pomoshch'yu absorbtsionnykh bromisto-litiyevykh kholodil'nykh mashin // Gazoturbinnyye

- tehnologii. 2014. № 10. s. 8-12. [Dzino A. A., Malinina O. S. Absorption refrigerating machines. St. Petersburg: ITMO University, 2015. 68 p. (In Russ)]
8. Dzino A.A., Malinina O.S. Absorbtsionnyye kholodil'nyye mashiny. SPb.: universitet ITMO, 2015. 68 s. [Dagodin D. L., Anokhin A. B., Latypov G. G., Krykin I. N. Cooling of the cyclic air of the PGU-110 compressor with the help of absorption lithium-bromide refrigerating machines. 2014. No 10. pp. 8-12.
 9. Zysin L. V. Parogazovyie i gazoturbinnyye teplovyye elektrostantsii. SPb.: Izd-vo Politekh. un-ta, 2010. 368 s. [Zysin L. V. combined-cycle and gas-turbine thermal power plant. SPb.: Publishing house of Polytechnical Institute. un-ta, 2010. 368 p. (In Russ)]
 10. Matyunin D.YU., Poluektova T.YU., Anokhin A.B., Krykin I.N. Ob itogakh realizatsii proyekta okhlazhdeniya tsiklovogo vozdukha kompressora GTU PGU-110 s primeneniym ABKHM // Gazoturbinnyye tekhnologii. 2015. T. 135, № 8. S. 12-16. [Matyunin D. Yu., Poluektova T. Yu., Anokhin A. B., Krygin I. N. On the results of the project of cooling the cyclic air of the compressor GTU PGU-110 with the use of ABHM // Gas Turbine technologies. 2015. Vol. 135, No. 8. pp. 12-16. (In Russ)]
 11. Morozuk L.I., Grudka B.G. Vvedeniye v eksergeticheskiy analiz absorbtsionno-rezorbtsionnoy kholodil'noy mashiny // Kholodil'naya tekhnika i tekhnologiya. 2017. T. 51, № 1. S. 4-10. DOI: <http://dx.doi.org/10.15673/ret.v53i1.533> [Morozuk L. I., Grudka B. G. Introduction to the exergetic analysis of the absorption-resorption refrigerating machine. 2017. Vol. 51, No. 1. pp. 4-10. DOI: <http://dx.doi.org/10.15673/ret.v53i1.533>(In Russ)]
 12. Morozuk T.V. Novyy etap v razvitii eksergeticheskogo analiza // Kholodil'naya tekhnika i tekhnologiya. 2014. T. 50, № 4. S. 13-17. [Morozuk T. V. a New stage in the development of exergy analysis // Refrigeration equipment and technology. 2014. Vol. 50, No. 4. pp. 13-17. (In Russ)]
 13. Radchenko A. N., Kantor S. A. Effektivnost' sposobov okhlazhdeniya vozdukha na vkhode GTU kompressornykh stantsiy v zavisimosti ot klimaticheskikh usloviy // Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya. 2015. № 1 (118). S. 95-98. [Radchenko A. N., Kantor S. A. Efficiency of air cooling methods at the inlet of GTU compressor stations depending on climatic conditions // Aerospace engineering and technology. 2015. No. 1 (118). pp. 95-98. (In Russ)]
 14. Tsatsaronis D. Interaction of thermodynamics and economics for minimizing the cost of an energy-converting system. Odessa: Studio "Negociant", 2002. 152 p.
 15. Tsanev S. V., Burov V. D., Remezov A. N. Gazoturbinnyye i parogazovyie ustanovki teplovykh elektricheskikh stantsiy. M.: Izd-vo MEI, 2002. 584 s. [Tsanev S. V., Burov V. D., Remezov A. N. Gas turbine and steam-gas installations of thermal power stations. Moscow: MEI Publishing House, 2002. 584 p. (In Russ)]
 16. Tskhyayev A.D., Kuz'mina T.G., Ispol'zovaniye ABKHM v sisteme okhlazhdeniya vozdukha na vkhode v kompressor GTU// Turbiny i dizeli. 2015. sentyabr'-oktyabr'. S. 10-13. [Tskhyaev A.D., Kuzmina T. G., The use of ABCM in the air cooling system at the inlet to the GTU compressor// Turbines and diesels. 2015. September-October. pp. 10-13. (In Russ)]
 17. [Sargut Ya. Exergia [Text] / Shargut Ya., Petela R. edited by V. M. Brodyansky V. M.-M.: Energiya, 1968. 288 p. (In Russ)]
 18. Morosuk T., Tsatsaronis G. A new approach to the exergy analysis of absorption refrigeration machines. Int. J. Energy. 2008 Sep 1; 33 (6). pp. 890-907. DOI: 10.1016/j.energy.2007.09.012
 19. Panahizadeh, F., Hamzehei, M., Farzaneh-Gord, M. et al. Energy, exergy, economic analysis and optimization of single-effect absorption chiller network. J Therm Anal Calorim (2020). <https://doi.org/10.1007/s10973-020-09966-4>
 20. Tenkeng, M., Wouagfack, P. and Tchinda, R. (2019) Exergy Analysis of a Double-Effect Solar Absorption Refrigeration System in Ngaoundere. World Journal of Engineering and Technology, 7, 158-174. DOI: 10.4236/wjet.2019.71011.

Сведения об авторах:

Галимова Лариса Васильевна, доктор технических наук, профессор, e-mail: galimova_lv@mail.ru
Байрамов Джамиль Загидович, аспирант, e-mail: bairamov.dzhamil@mail.ru

Information about the authors:

Larisa V. Galimova, Dr. Sci. (Technical), Prof., e-mail: galimova_lv@mail.ru
Dzhamil Z. Bayramov, Postgraduate, e-mail: bairamov.dzhamil@mail.ru

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 11.12.2020.

Принята в печать 20.01.2021.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 11.12.2020.

Accepted for publication 20.01.2021.

Для цитирования: О.В. Евдулов, Р.А.-М. Магомадов, К.А. Магомедова, Э.А. Джабраилова. Математическая модель термоэлектрической полупроводниковой системы для визуализации температурных полей объектов. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2021; 48 (1): 28-36. DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-1-28-36

For citation: O.V. Evdulov, R.A.-M. Magomadov, K.A. Magomedova, E.A. Dzhabrailova. Mathematical model of a thermoelectric semiconductor system for visualizing the temperature fields of objects. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2021; 48 (1): 28-36. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-1-28-36

**ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ
POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL MECHANICAL ENGINEERING**

УДК 621.362

DOI: 10.21822/2073-6185-2021-48-1-28-36

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ ОБЪЕКТОВ

¹О.В. Евдулов, ²Р.А.-М. Магомадов, ¹К.А. Магомедова, ¹Э.А. Джабраилова

¹Дагестанский государственный технический университет,

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

²Грозненский государственный нефтяной технический университет

им. академика М. Д. Миллионщикова,

²364051, г. Грозный, пр. Х.А. Исаева, д. 100, Россия

Резюме. Цель. Целью научной работы является разработка математической модели термоэлектрической полупроводниковой системы (ТЭС) для визуализации температурных полей объектов и исследование протекающих в ней теплофизических процессов. **Метод.** Разработана ТЭС для визуализации температурных полей плоских объектов с использованием жидкокристаллической пленки. Ее особенностью является повышение точности измерений за счет более точного сопряжения объекта и прибора. Проведено математическое моделирование системы, выполненное на основе решения нестационарной двумерной задачи теплопроводности с локальными истоками и стоками теплоты по площади жидкокристаллической пленки. **Результат.** Получены графики зависимости: двумерное распределение температуры по поверхности жидкокристаллической пленки при наличии истоков и стоков теплоты, изменение холодопроизводительности, холодильного коэффициента, напряжения питания термоэлектрического модуля (ТЭМ) от перепада температур между спаями для различных значений тока питания. **Вывод.** В результате расчетов установлено, что цветовая гамма жидкокристаллической пленки существенно меняется при наличии истоков и стоков теплоты по ее поверхности. При предварительной калибровке система позволяет не только визуализировать картину температурного поля объекта, но и определить значение его температуры в каждой точке. В соответствие с расчетными данными определено, что для обеспечения полноценной работы ТЭС могут быть использованы стандартные ТЭМ марки ICE-71 со следующими рабочими характеристиками: диапазон мощностей - от 16 до 35 Вт при среднем перепаде температур между спаями 55 К, ток питания - 2÷8 А при потребляемой мощности от 40 до 90 Вт, холодильный коэффициент - от 0,38 до 0,43.

Ключевые слова: температурное поле, визуализация, термоэлектрическая система, математическое моделирование, теплофизические процессы, численный эксперимент

MATHEMATICAL MODEL OF A THERMOELECTRIC SEMICONDUCTOR SYSTEM FOR VISUALIZING THE TEMPERATURE FIELDS OF OBJECTS

¹O.V. Evdulov, ²R. A.-M. Magomadov, ¹K.A. Magomedova, ¹E A. Dzhabrailova

¹Daghestan State Technical University,

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

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

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

Abstract. Objective. The research objective is to develop a mathematical model of a thermoelectric semiconductor system to visualize the temperature fields of objects and study the thermophysical internal processes. **Methods.** A thermoelectric semiconductor system was developed for visualizing the temperature fields of flat objects using a liquid crystal film. Its feature is to increase the accuracy of measurements due to a more accurate coupling of the object and the device. A mathematical simulation of the system was performed based on the solution of a dynamic two-dimensional heat conduction problem with local heat sources and sinks over the area of a liquid crystal film. **Results.** Dependency graphs were obtained for the dependency of two-dimensional temperature distribution over the surface of the liquid crystal film in the presence of heat sources and sinks, the change in the cooling capacity, the cooling ratio, the supply voltage of the thermoelectric module on the temperature difference between the junctions for different values of the supply current. **Conclusion.** As a result of calculations, it was found that the color gamut of a liquid crystal film changed significantly in the presence of heat sources and sinks on its surface. During pre-calibration, the system allows visualization of the object temperature field and determines the value of its temperature at each point. Following the calculated data, it is determined that to ensure the entire operation of the thermoelectric semiconductor system, a standard thermoelectric module ICE-71 can be used with the following specifications: power range – 16 to 35 W with an average temperature difference between the junctions – 55 K, the supply current – $2 \div 8$ A with a power consumption of 40 to 90 W, the cooling ratio is from 0.38 to 0.43.

Keywords: temperature field, visualization, thermoelectric system, mathematical simulation, thermophysical processes, numerical experiment

Введение. В настоящее время важными задачами измерительной техники являются определение и визуализация температурных полей различного рода плоских поверхностей [1,2]. Измерения подобного рода находят применение в машиностроении, энергетике, теплофизическом приборостроении, медицине и т.п.

С использованием визуализации температурного поля объекта может производиться оценка качества изделий и приборов на предмет наличия в их структуре пор, трещин и нежелательных вкраплений, оперативная диагностика состояния пациента на предмет выявления различных заболеваний, оценка качества тепловой изоляции электроэнергетических объектов и т.д. [3-8].

Среди существующих способов визуализации температурных полей на сегодняшний день можно выделить контактную термометрию (определение температурного поля путем непосредственного контакта с объектом), дистанционную инфракрасную термографию (применение инфракрасного термографа), телетермографию (основана на преобразовании инфракрасного излучения тела человека в электрический сигнал, который визуализируется на экране тепловизора), контактную холестерическую термографию (используются оптические свойства холестерических жидких кристаллов) [1,9-11].

Характеризуя каждый из перечисленных методов необходимо отметить их определенные недостатки, такие как: сложность реализации и технического исполнения (контактная термометрия), относительно невысокая точность определения температурного поля и высокая стоимость (телетермография, инфракрасная термография), сложность обеспечения начальной цветовой гаммы жидкокристаллической матрицы (холестерическая термография).

Постановка задачи. В этих условиях актуальным является разработка и исследование новых методов и технических средств, позволяющих с высокой степенью точности и эффективности производить визуализацию температурных полей объектов. В качестве таких технических средств перспективным является совместное использование свойств холестерических жидких кристаллов (далее жидкокристаллических пленок) и термоэлектрических преобразователей энергии, позволяющих с высокой степенью равномерности путем охлаждения, либо нагрева, устанавливать первоначальную цветовую гамму жидкокристаллической матрицы [12].

Целью работы является разработка математической модели ТЭС для визуализации температурных полей объектов и исследование протекающих в ней теплофизических процессов.

Методы исследования. Конструкция ТЭС для визуализации температурных полей объектов изображена на рис.1. Прибор состоит из основания, выполненного из высокотеплопроводного материала (например, меди) в виде рамки 1, на внутренней торцевой поверхности которой закреплена жидкокристаллическая пленка 2. Жидкокристаллическая пленка 2 закреплена на рамке 1 с помощью крепежных приспособлений 3, имеющих возможность перемещаться в вертикальном направлении при оказании на них механического давления (например, за счет шарнирного механизма), таким образом, чтобы она выступала за верх рамки в направлении к поверхности, температурное поле которой подлежит определению и визуализации. На внешней торцевой поверхности рамки 1 по ее периметру с хорошим тепловым контактом рабочей поверхностью установлены ТЭМ 4, опорной поверхностью сопряженные с радиаторами, питаемые электрической энергией от источника постоянного тока (на рис.1 не показан).

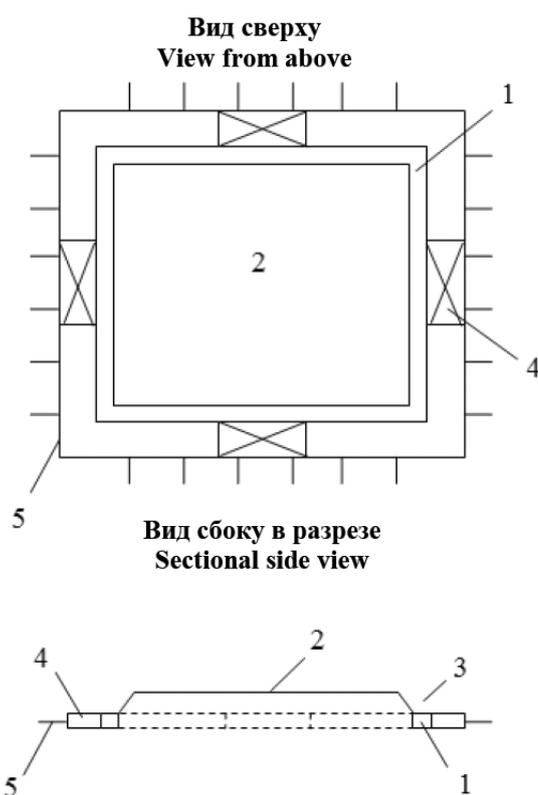


Рис.1. Конструкция ТЭС для визуализации температурных полей объектов
Fig. 1. TPP design for visualization of temperature fields of objects

Радиаторы образуют единую радиаторную систему 5, представляющую собой замкнутую поверхность из высокотеплопроводного материала, повторяющую контур рамки 1, со стороны, противоположной размещению ТЭМ 4, имеющую ребрение.

Система работает следующим образом. С помощью ТЭМ 4, находящихся в контакте с рамкой 1 температура жидкокристаллической пленки 2 стабилизируется на определенной температуре так, чтобы вся ее поверхность имела одинаковый цвет. Затем жидкокристаллическая пленка 2 приводится в тепловой контакт с поверхностью, температура которой подлежит визуализации. За счет неравномерности температуры поверхности жидкокристаллическая пленка 2 изменит цвет, причем цветовая картина будет соответствовать температурному полю поверхности. Наличие крепежного приспособления 3, имеющего возможность перемещения в вертикальном направлении, сопровождаемого перемещением в том же направлении жидкокристаллической пленки 2, позволяет визуализировать температурные поля как ровных, так и вогнутых

и выпуклых поверхностей. Радиаторная система 5 предназначена для отвода теплоты и стабилизации температуры опорной поверхности ТЭМ 4.

Для исследования теплофизических процессов, происходящих в ТЭС разработана ее математическая модель. Математическая модель реализована на основе решения задачи определения температурного поля плоской пластины с размещенными по ее поверхности дискретными истоками и стоками теплоты произвольной формы при условии фиксированного теплового потока по ее периметру.

Математическая формулировка этой задачи имеет вид [13]:

$$\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + q_{ТЭБ}(x, y) + q_{ср} = c\rho \frac{\partial T}{\partial \tau}, \quad (1)$$

$$q(x, y) = \sum_{j=1}^J q_j(x, y), \quad (2)$$

$$q_j(x, y) = \begin{cases} \frac{Q_j}{S_j} & \text{в области источника энергии} \\ 0 & \text{вне области источника энергии} \end{cases}, \quad (3)$$

$$S_j = \iint_{S_j} S_j(x, y) dx dy, \quad (4)$$

$$q_{ср} = k_{ср}(T - T_{ср}), \quad (5)$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = q_{ТЭМ} \text{ по периметру } L, \quad (6)$$

$$T = T_{ср} \text{ при } \tau = 0, \quad (7)$$

где Q_j – мощность j -го истока (стока) теплоты; $q_{ср}$ – поверхностная плотность теплового потока, поступающего из окружающей среды, на объект;

L – кривая, ограничивающая площадь зоны определения температурного поля;

n – нормаль к кривой L , $n = (xh + yg)$;

h, g – единичные вектора,

λ, c, ρ – коэффициент теплопроводности, теплоемкость и плотность объекта,

$T_{ср}$ – температура окружающей среды,

$q_{ТЭМ}$ – плотность теплового потока ТЭМ.

Решение системы уравнений (1)-(7) методом конечных элементов позволяет определить температурное поле объекта, а также отследить его изменение во времени.

Связь между значением $q_{ТЭБ}$ и геометрическими, электро- и теплофизическими параметрами ТЭМ, а также питающим током, напряжением и мощностью может быть определена по известным соотношениям, описанным, например в работах Л.И. Анатычука, Т.А. Исмаилова и др. [14-18]

Другим методом определения параметров ТЭМ является применение специальных пакетов прикладных программ фирм – производителей стандартных типов ТЭБ. Нами при расчетах использован пакет прикладных программ Thermoelectric system calculation [19].

Обсуждение результатов. На рис.2 представлены результаты численного эксперимента в виде температурных полей жидкокристаллической пленки индикатора ТЖК608 квадратной формы с ребром 80 мм [20].

В качестве ТЭМ предполагалось использование 4 стандартных модулей типа ICE-71, располагаемых по периметру. В соответствии с расчетами для обеспечения требуемых режимов рабочий диапазон мощностей ТЭМ будет находиться в пределах от 16 до 35 Вт при среднем

перепаде температур между спаями 55 К. При этом, ток питания будет составлять $2 \div 8$ А при потребляемой мощности от 40 до 90 Вт.

Холодильный коэффициент изменяется в пределах от 0,38 до 0,43. На рис.2, б имеет место источник теплоты, рис.2, г - сток теплоты и на рис.2, в - источник и сток теплоты одновременно.

Согласно представленным картинам цветовая гамма жидкокристаллической пленки в данных случаях существенно меняется и при предварительной калибровке позволяет не только визуализировать картину температурного поля объекта, но и определить значение его температуры в каждой точке.

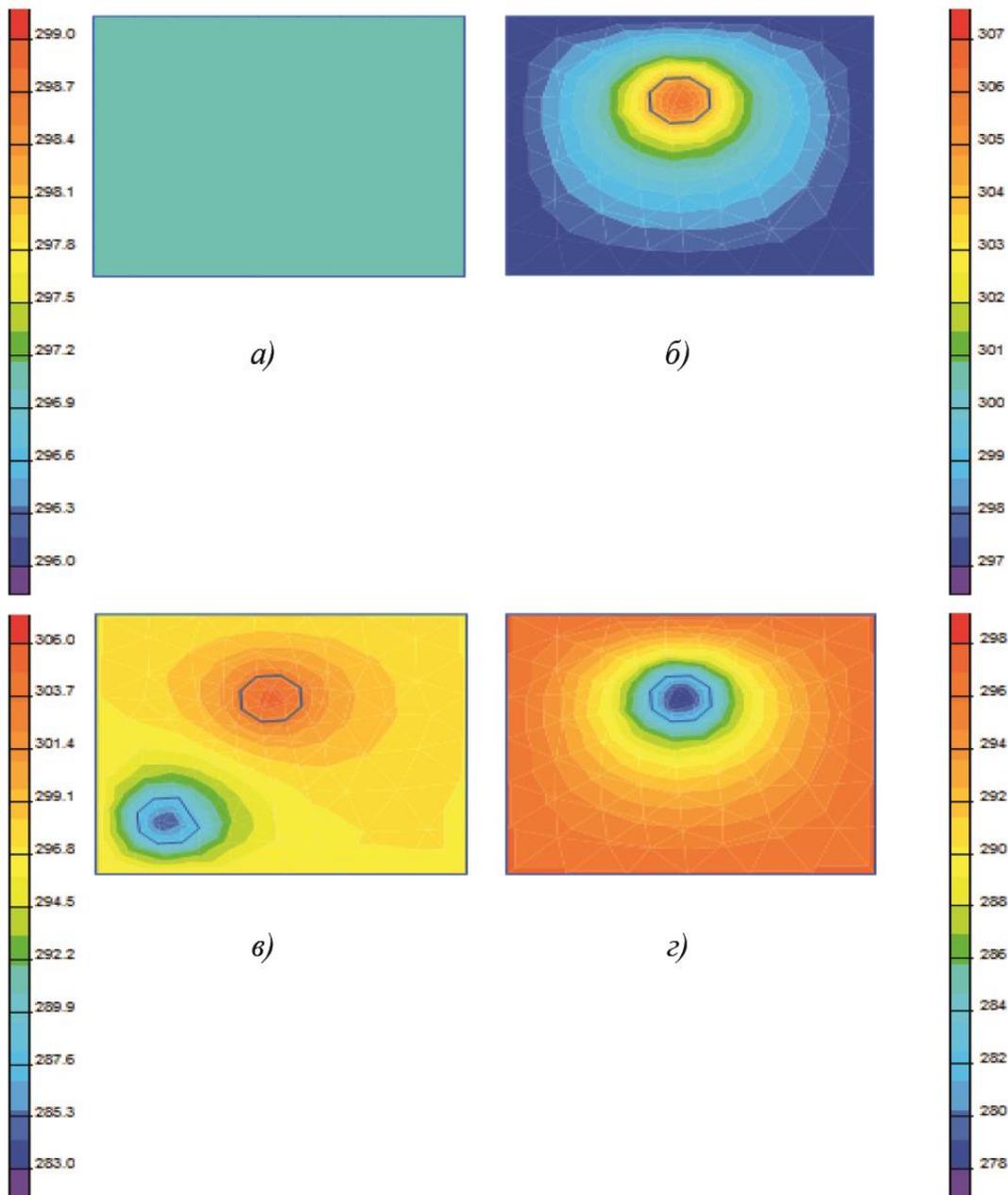


Рис. 2. Картины температурных полей жидкокристаллической пленки
Fig. 2. Pictures of temperature fields of liquid crystal film

На рис. 3 – 5 представлены зависимости, отражающие основные параметры используемых ТЭМ.

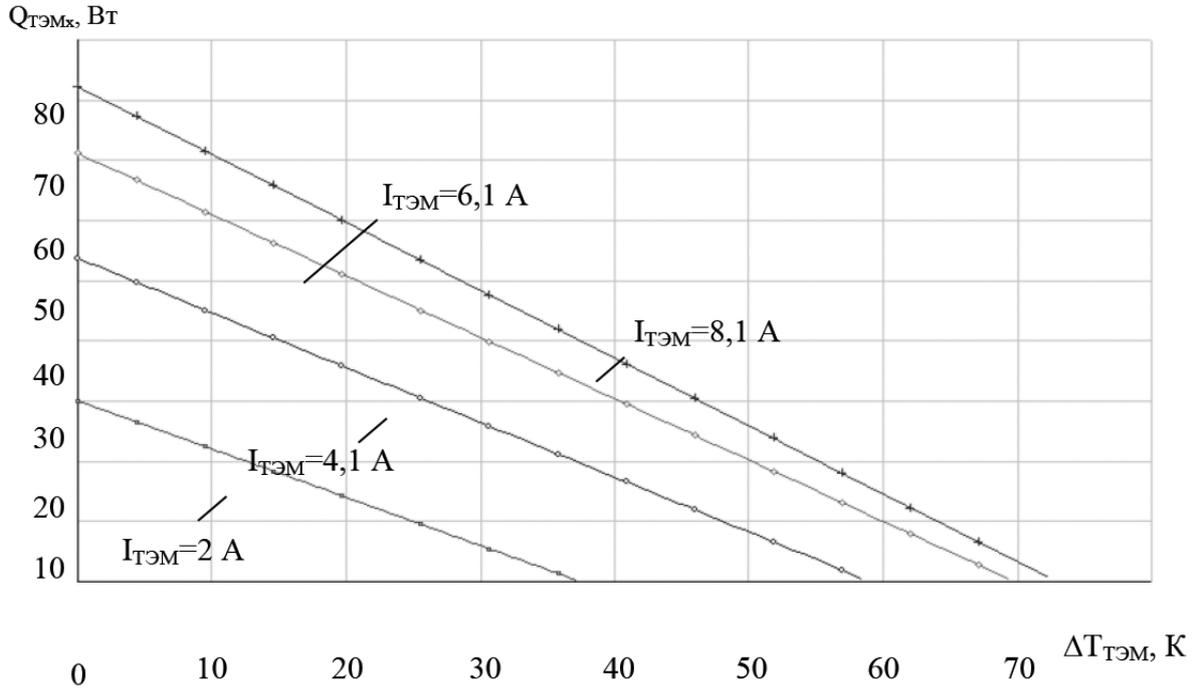


Рис.3. Зависимость холодопроизводительности ТЭМ от перепада температур между его спаями при различных значениях тока питания

Fig. 3. Dependence of the refrigerating capacity of the TEM on the temperature difference between its junctions at different values of the supply current

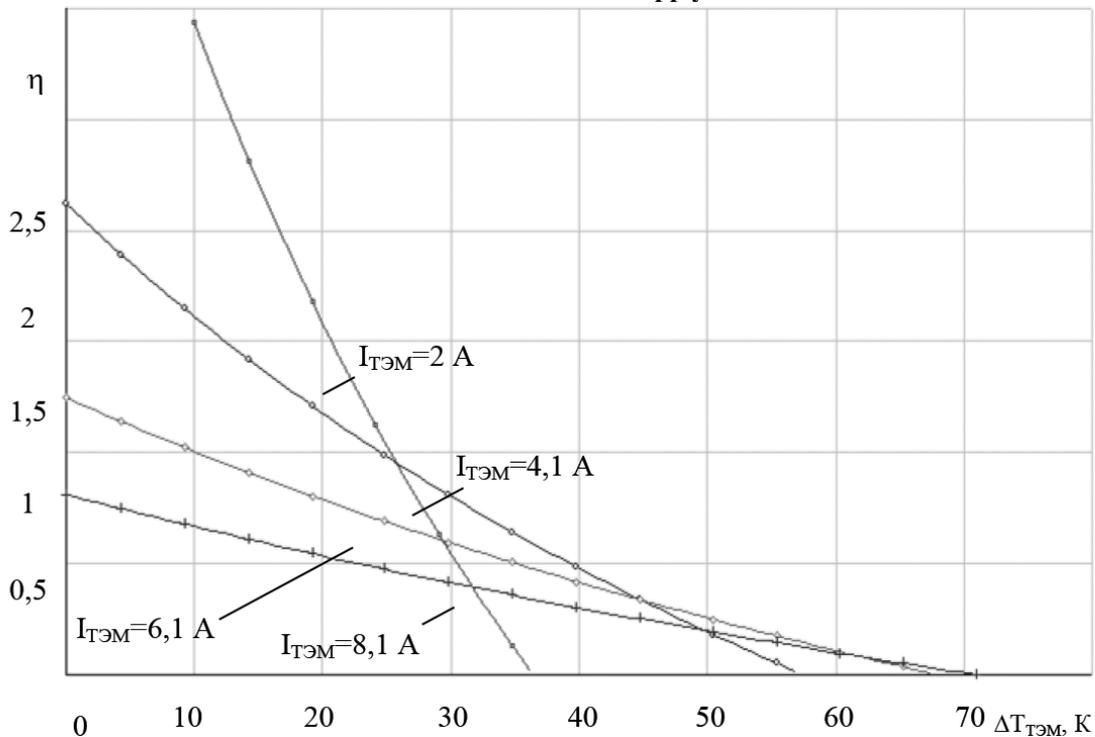


Рис. 4. Зависимость холодильного коэффициента ТЭМ от перепада температур между его спаями при различных значениях тока питания

Fig. 4. Dependence of the coefficient of performance of the TEM on the temperature difference between its junctions at different values of the supply current

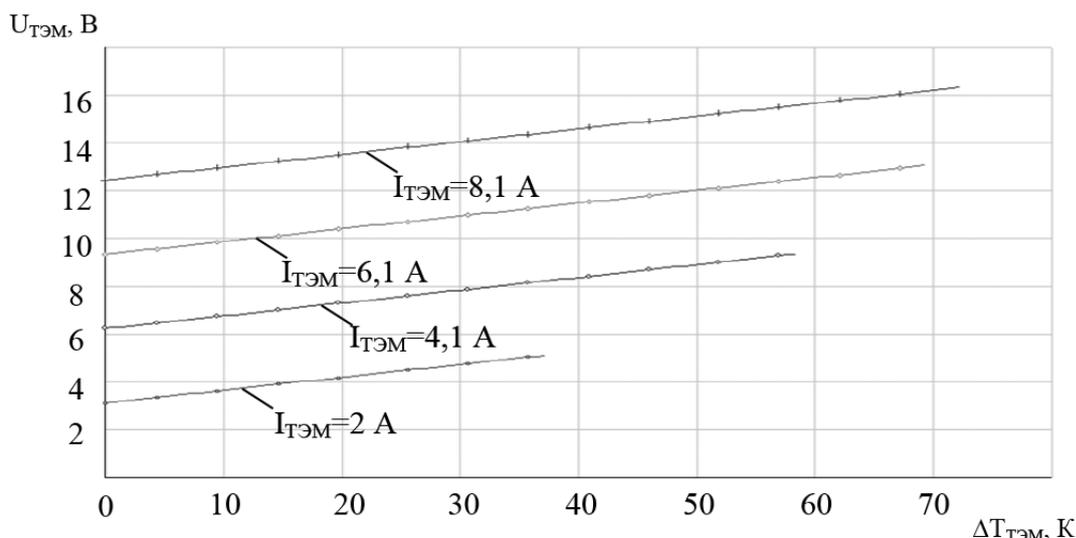


Рис.5. Зависимость напряжения питания ТЭМ от перепада температур между его спаями при различных значениях тока питания

Fig. 5. Dependence of the TEM supply voltage on the temperature difference between its junctions at different values of the supply current

Представлены графики зависимости: изменение холодопроизводительности, холодильного коэффициента, напряжения питания ТЭМ от перепада температур между спаями для различных значений тока питания.

Графики получены при температуре горячего спая ТЭМ 310 К, максимальных значениях $I_{ТЭМmax}=8,1 A$, $Q_{ТЭМmax}=82 W$, $U_{ТЭМmax}=16,4 V$, $\Delta T_{ТЭМmax}=73 K$, геометрических размерах модуля: длина - 40 мм, ширина - 40 мм, высота - 3,4 мм.

Вывод. В настоящее время в таких областях жизнедеятельности человека, как машиностроение, приборостроение, энергетика, медицина одной из актуальных задач является задача визуализации температурных полей различных объектов.

Решение данной задачи дает возможность повысить эффективность анализа надежности работы разрабатываемой аппаратуры, а в области медицины осуществлять экспресс-диагностику различных заболеваний по аномально высокой или низкой температуре человека. Авторами разработана ТЭС для визуализации температурных полей плоских объектов с использованием жидкокристаллической пленки.

Ее особенностью является повышение точности измерений за счет более точного сопряжения объекта и прибора. Проведено математическое моделирование системы, выполненное на основе решения нестационарной двумерной задачи теплопроводности с локальными источниками и стоками теплоты по площади жидкокристаллической пленки.

В результате расчетов установлено, что цветовая гамма жидкокристаллической пленки существенно меняется при наличии источников и стоков теплоты по ее поверхности. При предварительной калибровке система позволяет не только визуализировать картину температурного поля объекта, но и определить значение его температуры в каждой точке. В соответствии с расчетными данными определено, что для обеспечения полноценной работы ТЭС могут быть использованы стандартные ТЭМ марки ICE-71 со следующими рабочими характеристиками: диапазон мощностей - от 16 до 35 Вт при среднем перепаде температур между спаями 55 К, ток питания - 2÷8 А при потребляемой мощности от 40 до 90 Вт, холодильный коэффициент - от 0,38 до 0,43.

Библиографический список:

1. Атрошенко, Ю.К. Теплотехнические измерения и приборы / Ю.К. Атрошенко, Е.В. Иванова. Томск: ТПУ, 2014. 151 с.

2. Александров, А.А., Теплотехника / А.А. Александров, А.М. Архаров, И.А. Архаров, [и др.]. М: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. 880 с.
3. Дульнев, Г.Н. Теория тепло- и массообмена / Г.Н. Дульнев. СПб.: СПбНИУИТМО, 2012. 195 с.
4. Корнеев, А.В. Первая медицинская помощь / А.В. Корнеев. Донецк: БАО, 2013. 240 с.
5. Bergman, T.L. Fundamentals of heat and mass transfer / T.L. Bergman, A.S. Lavine, F.P. Incropera, D.P. Dewitt. New York: John Wiley & Sons, 2011. 1076 p.
6. Pasquali P. Cryosurgery: a practical manual / P. Pasquali. New York: Springer, 2015. 441 p.
7. Яромич, И.В. Скорая и неотложная медицинская помощь / И.В. Яромич. Минск: Вышэйшая школа. 2010. 289 с.
8. Исмаилов, Т.А. Экспериментальный стенд для измерения рабочих характеристик термоэлектрического устройства для локального замораживания тканей гортани / Т.А. Исмаилов, О.В. Евдулов, Т.А. Рагимова // Ползуновский вестник. 2010. №2. С. 166-169.
9. Жаркова, Г.М. Оптические методы формирования высокоструктурированных полимерно-жидкокристаллических композитов / Г.М. Жаркова, О.Ю. Подъячева, С.А. Стрельцов // Жидкие кристаллы и их практическое применение. 2015. № 3. С. 91-102.
10. Жаркова, Г. М., Петров А. П., Стрельцов С. А., Хачатурян В. М. Влияние температуры на свойства поляризационных голографических решёток, сформированных в жидкокристаллических композитах / Г.М. Жаркова, А.П. Петров, С.А. Стрельцов, В.М. Хачатурян // Автометрия. 2012. № 4. С. 55-59.
11. Михайлин, Ю.А. Жидкокристаллические полимеры / Ю.А. Михайлин // Полимерные материалы. 2006. №2. С. 24-30.
12. Евдулов, О.В., Магомедова К.А., Миспахов И.Ш. Устройство для определения и визуализации температурных полей плоских объектов / О.В. Евдулов, К.А. Магомедова, И.Ш. Миспахов // Материалы Всероссийской молодежной НПК "Программно-техническое обеспечение автоматизированных систем". Барнаул: АГТУ. 2018. С.115-117.
13. Анатычук, Л.И. Термоэлектричество. Термоэлектрические преобразователи энергии / Л.И. Анатычук. Киев, Черновцы: Институт термоэлектричества, 2003. 376 с.
14. Исмаилов, Т.А. Охлаждающие системы на базе высокоэффективных термоэлектрических полупроводниковых преобразователей / Т.А. Исмаилов, О.В. Евдулов, Р.А.-М. Магомадов. СПб.: Политехника, 2020. 285 с.
15. Nagase, K. Development of durability testing for thermoelectric power generation module / K. Nagase, A. Yamamoto // Journal of Kinzoku materials science and technology. 2016. №3. pp.1347-1364.
16. Rowe, D.M. Thermoelectrics and its energy harvesting, materials, preparation and characterization / D.M. Rowe. BocaRaton: CRC Press. 2012. 567 p.
17. Goldsmid, H.J. Introduction to thermoelectricity / H.J. Goldsmid. New York: Springer, 2010. 121 p.
18. Goldsmid, H.J. Thermoelectric refrigeration / H.J. Goldsmid. New York: Springer, 2013. 240 p.
19. <http://www.kryotherm.spb.ru> (дата доступа 18.01.2021 г.).
20. <https://www.yalosindicator.com> (дата доступа 18.01.2021 г.).

References:

1. Atroshenko, YU.K. Teplotekhnicheskiye izmereniya i pribory / YU.K. Atroshenko, Ye.V. Ivanova. Tomsk: TPU, 2014. 151 s. [Atroshenko, Yu.K. Heat engineering measurements and devices / Yu.K. Atroshenko, E.V. Ivanova. Tomsk: TPU, 2014.151 p. (In Russ)]
2. Aleksandrov, A.A., Teplotekhnika / A.A. Aleksandrov, A.M. Arkharov, I.A. Arkharov, [i dr.]. M: MGTU im. N.E. Bauman, 2017. 880 s [Aleksandrov, A.A., Heat engineering / A.A. Alexandrov, A.M. Arkharov, I.A. Arkharov, [and others]. M: MGTU im. N.E. Bauman, 2017.880 p. (In Russ)]
3. Dul'nev, G.N. Teoriya teplo- i massoobmena / G.N. Dul'nev. SPb.: SPbNIUITMO, 2012. 195 s. [Dulnev, G.N. Theory of heat and mass transfer / G.N. Dulnev. SPb.: SPbNIUITMO, 2012.195 p. (In Russ)]
4. Korneev, A.V. First aid / A.V. Korneev. Donetsk: BAO, 2013.240 p.
5. Bergman, T.L. Fundamentals of heat and mass transfer / T.L. Bergman, A.S. Lavine, F.P. Incropera, D.P. Dewitt. New York: John Wiley & Sons, 2011.1076 p.
6. Pasquali P. Cryosurgery: a practical manual / P. Pasquali. New York: Springer, 2015.441 p.
7. Yaromich, I.V. Ambulance and emergency medical care / I.V. Yaromich. Minsk: High school. 2010.289 s.
8. Ismailov, T.A. Eksperimental'nyy stend dlya izmereniya rabochikh kharakteristik termoelektricheskogo ustroystva dlya lokal'nogo zamorazhivaniya tkaney gortani / T.A. Ismailov, O.V. Yevdulov, T.A. Ragimova // Polzunovskiy vestnik. 2010. №2. S. 166-169. [Ismailov, T.A. Experimental stand for measuring the performance characteristics of a thermoelectric device for local freezing of laryngeal tissues / T.A. Ismailov, O. V. Evdulov, T.A. Ragimova // Polzunovsky Bulletin. 2010. No. 2. pp. 166-169. (In Russ)]
9. Zharkova, G.M. Opticheskiye metody formirovaniya vysokostrukturirovannykh polimerno-zhidkokristallicheskiikh kompozitov / G.M. Zharkova, O.YU. Pod'yacheva, S.A. Strel'tsov // Zhidkiye kristally i ikh prakticheskoye primeneniye. 2015. № 3. S. 91-102. 1 [Zharkova, G.M. Optical methods for the formation of highly structured polymer-liquid crystal composites / G.M. Zharkova, O. Yu. Podyacheva, S.A. Strel'tsov // Liquid crystals and their practical application. 2015. No. 3. pp. 91-102. (In Russ)]

10. Zharkova, G. M., Petrov A. P., Strel'tsov S. A., Khachaturyan V. M. Vliyaniye temperatury na svoystva polyarizatsionnykh golograficheskikh reshotok, sformirovannykh v zhidkokristallicheskiy kompozitakh / G.M. Zharkova, A.P. Petrov, S.A. Strel'tsov, V.M. Khachaturyan // Avtometriya. 2012. № 4. S. 55-59. [Zharkova, GM, Petrov AP, Strel'tsov SA, Khachaturyan VM Influence of temperature on the properties of polarization holographic gratings formed in liquid crystal composites. Zharkov, A.P. Petrov, S.A. Strel'tsov, V.M. Khachaturian // Autometry. 2012. No. 4. pp. 55-59. (In Russ)]
11. Mikhaylin, YU.A. Zhidkokristallicheskiye polimery / YU.A. Mikhaylin // Polimernyye materialy. 2006. №2. S. 24-30. [Mikhailin, Yu.A. Liquid crystal polymers / Yu.A. Mikhailin // Polymer materials. 2006. No. 2. pp. 24-30. (In Russ)]
12. Yevdulov, O.V., Magomedova K.A., Mispakhov I.SH. Ustroystvo dlya opredeleniya i vizualizatsii temperaturnykh poley ploskikh ob"yektov / O.V. Yevdulov, K.A. Magomedova, I.SH. Mispakhov // Materialy Vserossiyskoy molodezhnoy NPK "Programmno-tekhnicheskoye obespecheniye avtomatizirovannykh sistem". Barnaul: AGTU. 2018. S.115-117. [Yevdulov, O.V., Magomedova K.A., Mispakhov I.Sh. Device for determination and visualization of temperature fields of flat objects / O.V. Yevdulov, K.A. Magomedova, I. Sh. Mispakhov // Materials of the All-Russian Youth Research and Production Complex "Software and hardware support of automated systems". Barnaul: AGTU. 2018. pp.115-117. (In Russ)]
13. Anatyshchuk, L.I. Thermoelectricity. Thermoelectric energy converters / L.I. Anatyshchuk. Kiev, Chernivtsi: Institute of Thermoelectricity, 2003.376 p.
14. Ismailov, T.A. Okhlazhdayushchiye sistemy na baze sil'notochnykh termoelektricheskikh poluprovodnikovyykh preobrazovateley / T.A. Ismailov, O.V. Yevdulov, R.A.-M. Magomadov. SPb.: Politehnika, 2020. 285 s. [Ismailov, T.A. Cooling systems based on high-current thermoelectric semiconductor converters / T.A. Ismailov, O. V. Yevdulov, R.A.-M. Magomadov. Saint Petersburg: Polytechnic, 2020.285 p. (In Russ)]
15. Nagase, K. Development of durability testing for thermoelectric power generation module / K. Nagase, A. Yamamoto // Journal of Kinzoku materials science and technology. 2016. No. 3. pp. 1347-1364.
16. Rowe, D.M. Thermoelectrics and its energy harvesting, materials, preparation and characterization / D.M. Rowe. BocaRaton: CRC Press. 2012.567 p.
17. Goldsmid, H.J. Introduction to thermoelectricity / H.J. Goldsmid. New York: Springer, 2010.121 p.
18. Goldsmid, H.J. Thermoelectric refrigeration / H.J. Goldsmid. New York: Springer, 2013.240 p.
- 19.<http://www.kryotherm.spb.ru> (accessed 01/18/2021).
- 20.<https://www.yalosindicator.com> (accessed 01/18/2021).

Сведения об авторах:

Евдулов Олег Викторович, доктор технических наук, доцент, доцент кафедры теоретической и общей электротехники, e-mail: ole-ole-ole@rambler.ru

Магомадов Рустам Абу-Муслимович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой электротехники и электропривода, e-mail: rustmag_80@mail.ru

Магомедова Кумсият Ахмедулбадавиевна, аспирант кафедры теоретической и общей электротехники, e-mail: nice.kumsiyat@mail.ru.

Джабраилова Эльмира Асадулаевна. аспирант кафедры теоретической и общей электротехник, e-mail: abdurashidova-e@mail.ru.

Information about the authors:

Oleg V.Evdulov, Dr. Sci. (Technical), Assoc. Prof., Department of Theoretical and General Electrical Engineering, e-mail: ole-ole-ole@rambler.ru.

Rustam A. Magomadov, Cand. Sci. (Technical), Assoc. Prof., Head of the Department of Electrical Engineering and Electric Drive, e-mail: rustmag_80@mail.ru

Kumsiyat A.Magomedova, Postgraduate Student, Department of Theoretical and General Electrical Engineering, e-mail: nice.kumsiyat@mail.ru.

Elmira A.Dzhabrailova, Postgraduate Student, Department of Theoretical and General Electrical Engineering, e-mail: abdurashidova-e@mail.ru.

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 02.12.2020.

Принята в печать 12.01.2021.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 02.12.2020.

Accepted for publication 12.01.2021.

Для цитирования: И.Е. Лобанов. Моделирование теплообмена на воздухе в круглых трубах с треугольными и квадратными турбулизаторами для высоких, вплоть до миллиона, критериев Рейнольдса. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2021; 48 (1): 37-50. DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-1-37-50

For citation: I.E. Lobanov. Simulation of air heat transfer in circular pipes with triangular and square turbulence stimulators for high Reynolds criteria up to one million. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2021; 48 (1): 37-50. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-1-37-50

**ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ
POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL MECHANICAL ENGINEERING**

УДК 532.517.4 : 536.24

DOI: 10.21822/2073-6185-2021-48-1-37-50

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА НА ВОЗДУХЕ В КРУГЛЫХ ТРУБАХ
С ТРЕУГОЛЬНЫМИ И КВАДРАТНЫМИ ТУРБУЛИЗАТОРАМИ ДЛЯ ВЫСОКИХ,
ВПЛОТЬ ДО МИЛЛИОНА, КРИТЕРИЕВ РЕЙНОЛЬДСА**

И.Е. Лобанов

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4, Россия

Резюме. Цель. Математическое моделирование систем структур смерчевых зон между циклическими турбулизаторами потоков с поверхностным расположением треугольных и квадратных поперечных профилей на базе многоблочно-вычислительных технологий, основывающихся на решениях факторизованной конечно-объемной процедурой уравнений Рейнольдса (замыкающихся посредством модели переносов напряжений сдвига Менстера) и уравнений энергий (на разномасштабно-пересекающейся структурированной сетке) при высоких критериях Рейнольдса $Re=10^6$ с приведением исчерпывающего анализа соответствующих линий токов. **Метод.** Расчёты основаны на решении факторизованной конечно-объемной процедуре уравнений Рейнольдса, которые замыкаются с помощью низкорейнольдсовой модели переносов напряжений сдвига Менстера, и уравнений энергии на разномасштабно-пересекающейся структурированной сетке (ФКОМ). **Результат.** Проведены математические моделирования теплообменного процесса в прямых и круглых горизонтальных трубах с турбулизаторами с $d/D=0,95...0,90$ и $t/D=0,25...1,00$ треугольного и квадратного поперечных профилей при больших числах Рейнольдса ($Re=10^6$) на фундаменте с многоблочными вычислительными технологиями, которые основаны на решениях факторизованным и конечно-объемным алгоритмом рейнольдсовых уравнений и уравнений энергии. Получено, что относительная интенсификация теплообмена $[(Nu/Nu_{ГЛ})|_{Re=10^6}]/[(Nu/Nu_{ГЛ})|_{Re=10^5}]$ в круглых трубах с квадратными турбулизаторами на воздухе для больших чисел Рейнольдса ($Re=10^6$), что вполне может быть актуально в применяемых в теплообменниках каналах, может быть выше при масштабном приращении гидросопротивления, чем для несколько меньших чисел ($Re=10^5$), для относительно высоких турбулизаторов потока $d/D=0,90$ для всего рассматриваемого диапазона для параметра относительного шага между ними $t/D=0,25...1,00$ немногим более 3%; для турбулизаторов треугольных поперечных профилей аналогичные показатели примерно такие же. При более низких квадратных турбулизаторах с $d/D=0,95$ данное увеличение относительно теплообмена для больших чисел Рейнольдса ($Re=10^6$) сравнительно с меньшими числами ($Re=10^5$) не превышает 6%; для турбулизаторов треугольных поперечных профилей аналогичные показатели составляют немногим более 4%. **Вывод.** Модель может применяться для осуществления оптимизации интенсификации посредством турбулизаторов, а также управлять процессами интенсификации теплоотдачи. Для более высоких квадратных турбулизаторов и при более высоких числах Рейнольдса ограниченное повышение относительного критерия Нуссельта $Nu/Nu_{ГЛ}$ сопровождается значительным повышением относительного гидросопротивления по причине очень значительного влияния возвратных течений, которые могут натекать непосредственно на сам турбулизатор в тем большей степени, чем выше число Рейнольдса; для треугольных турбулизаторов вышеуказанная тенденция сохраняется и даже углубляется. **Ключевые слова:** теоретический, математический, моделирование, турбулизатор, труба, поперечное сечение, треугольный, квадратный, полукруглый, диафрагма, критерий Рейнольдса; теплоноситель, модель Менстера

SIMULATION OF AIR HEAT TRANSFER IN CIRCULAR PIPES WITH TRIANGULAR AND SQUARE TURBULENCE STIMULATORS FOR HIGH REYNOLDS CRITERIA UP TO ONE MILLION

I.E. Lobanov

Moscow Aviation Institute (National Research University),
4 Volokolamskoe highway, A-80, GSP-3, Moscow 125993, Russia

Abstract. Objective. Conduct mathematical modeling of tornado zone structure systems between cyclic flow turbulence stimulators with the surface arrangement of triangular and square cross-sections based on multiblock computational techniques, based on solutions of the factorized finite-volume procedure of the Reynolds equations (closed through the Menter shear stress transport model) and energy equations (on a multiscale intersecting structured grid) at high Reynolds criteria $Re=10^6$ with an exhaustive analysis of the relevant current lines. **Methods.** The calculations were carried out on a mathematical foundation based on the solution of the factorized finite-volume procedure of the Reynolds equations, which are closed using the low-Reynolds Menter shear stress transport model, and the energy equations on a multiscale intersecting structured grid (factorized finite-volume procedure). **Results.** Mathematical simulations of the heat exchange process in straight and round horizontal pipes with turbulence stimulators with $d/D=0.95...0.90$ and $t/D=0.25...1.00$ of triangular and square transverse profiles with large Reynolds numbers ($Re=10^6$) on a foundation with multiblock computing technologies, which are based on solutions of factorized and finite-volume Reynolds equations and energy equations, were conducted. It was found that the relative intensification of heat transfer $[(Nu/Nu_{GL})|_{Re=10^6}]/[(Nu/Nu_{GL})|_{Re=10^5}]$ in round pipes with square air turbulence stimulators for large Reynolds numbers ($Re=10^6$), which may be relevant in the channels used in heat exchangers, could be higher with a large-scale increment of hydraulic resistance than for slightly smaller numbers ($Re=10^5$), for relatively high flow turbulence stimulators $d/D=0.90$ for the entire range under consideration for the parameter of the relative step between them $t/D=0.25...1.00$ a little more than 3%; for triangular turbulence stimulators, the cross-section profiles have similar values. For lower square turbulence stimulators with $d/D=0.95$, this increase in relative heat transfer for large Reynolds numbers ($Re=10^6$) compared to smaller numbers ($Re=10^5$) does not exceed 6%; for triangular cross-section turbulence stimulators, similar indicators are slightly more than 4%. **Conclusion.** The calculated results based on the developed model can optimize the intensification by turbulence stimulators and control the processes of heat transfer intensification. It is shown that for higher square turbulence stimulators and higher Reynolds numbers, a limited increase in the relative Nusselt criterion Nu/Nu_{GL} is accompanied by a significant increase in the relative hydro resistance due to the very significant influence of return currents, which can flow directly on the turbulence stimulator to the greater extent, the higher the Reynolds number; for triangular turbulence stimulators, the above trend persists and even deepens.

Keywords: theoretical, mathematical, modeling, turbulence stimulator, pipe, cross-section, triangular, square, semicircular, diaphragm, Reynolds criterion; coolant, Menter model

Введение. Общеизвестный и вполне практически апробированный метод смерчевой (вихревой) интенсификации теплоотдачи состоит в нанесении системы турбулизаторов на стенках омываемой поверхности канала с периодическим расположением [1,5]. Изучение структур течений с интенсификацией потока, как правило, делались экспериментальным способом [2, 5,6], однако, существующие новые расчётные исследования в данном направлении были не очень многочисленными [1-4], но только частичным образом посвящаются напрямую исследованию структуры интенсифицированных потоков; определённая часть из этих способов (к примеру, частично работы [7-9, 4]) применяют исключительно осреднённые (интегральные) приёмы к вышеуказанной задаче. В последнее время интенсивным образом получили развитие многоблочно-вычислительные технологии для решения задачи вихревых потоков теплофизики и аэромеханики, базирующиеся на пересекающейся структурированной сетке. Теоретические научные исследования для местных (локальных) и для интегральных (осреднённых) характеристик течений и теплоотдачи в каналах турбулизаторами треугольных и квадратных поперечных сечений представляются преимущественно перспективными в направлениях разработок, базирующихся на многоблочно-вычислительных технологиях со специализированными распараллеленными пакетами, специализированные направленности которых изложены ниже.

Специфичная многоблочно-вычислительная технология [1-4] основана на разномасштабно-пересекающейся структурированной сеточной совокупности, с целью высокоэффек-

тивных и уточнённых решений для нестационарной 2-х-мерной и для нестационарной 3-х-мерной задачи в отношении конвективного теплообмена в круглой прямой трубе с организованными искусственными шероховатостями в форме турбулизаторов в гомогенных рабочих средах в достаточно широких диапазонах для критерия Рейнольдса ($Re=10^4 \dots 10^6$) и для критерия Прандтля ($Pr=0,7 \dots 12$).

Постановка задачи. Основная цель настоящего научного исследования состоит в том, чтобы теоретически исследовать вихревые зоны для трубы с выступами квадратных и треугольных профилей при помощи факторизованных конечно-объёмных методов (ФКОМ-ов), которые были успешным образом апробированы в целях расчётов сходных потоков в исследованиях [1-4], в которых основное внимание было обращено на расчёты осреднённых характеристик интенсифицированных потоков и теплоотдачи.

Методы исследования. Отличительным признаком от существующих версий пакетов [1-4] следует признать то, что методологическая основа была дополнена применением периодическо-граничных условий, которые позволили оценить асимптотические показатели интенсифицированных течений и теплообмена в трубах с дискретными шероховатостями. Модифицирование позволяет поднять эффективность при вычислительных операциях для моделировании, осуществлять корректирование по кривизне на линии токов. Для канала с выступами детерминированию подвергаются: распределение поверхностных местных и осреднённых термических и силовых параметров (давление, трение, тепловой поток, сопротивление течению, гидравлические потери), профили скоростных составляющих, давление, температура, параметры, описывающие турбулентность потока (энергия турбулентности, вязкость турбулентная, тензорные компоненты для рейнольдсового напряжения, диссипация, генерация, и т.п.).

Первоначальная система с дифференциальными уравнениями в частных производных, т.е. уравнений Рейнольдса, Навье-Стокса, смыкается при помощи специфических модификаций в плане учёта кривизны у линий токов благодаря модели Менстера для переносов напряжений сдвига.

В математической модели расчёта гидродинамики и теплообмена в круглых трубах с периодически расположенными поверхностными турбулизаторами потока различного поперечного сечения, например, для труб с диафрагмами, рассматривается турбулентное течение ньютоновской несжимаемой жидкости с постоянными теплофизическими свойствами в отсутствии массовых сил. Осреднённое течение описывается уравнениями Рейнольдса, дополняется уравнениями неразрывности и энергии:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho \frac{\partial \bar{w}_i}{\partial t} = - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 \bar{w}_i}{\partial x_i \partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_{T_{ij}} \left(\frac{\partial \bar{w}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{w}_j}{\partial x_i} \right) \right]; \\ \frac{\partial \bar{w}_i}{\partial x_i} = 0; \\ \frac{d\bar{T}}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(a + a_{T_j}) \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} \right], \end{array} \right. \quad (1)$$

где $i, j = 1, 2, 3$; x_i, x_j – координаты; ρ – плотность; t – время; $w_i = \bar{w}_i + w_i'$,

$p = \bar{p} + p'$, $T_i = \bar{T}_i + T_i'$, – осреднённые и пульсационные составляющие скорости, давления и температуры соответственно; μ – коэффициент динамической вязкости; $\mu_{T_{ij}}$ – коэффициенты турбулентной динамической вязкости; a – температуропроводность; a_{T_j} – коэффициент турбулентного переноса теплоты.

Для того чтобы решить данную систему уравнений, её необходимо замкнуть зависимостью коэффициента турбулентной вязкости от параметров потока.

Для k - ε -модели данная зависимость выглядит следующим образом $V_T = \frac{k^2}{\varepsilon}$, а для k -модели – $V_T = \frac{k}{\omega}$, где V_T – коэффициент турбулентной кинематической вязкости; k – кинетическая энергия турбулентных пульсаций; ε – скорость диссипации турбулентной кинетической энергии; ω – диссипация на единицу турбулентной энергии.

Для замыкания уравнений движения жидкости используется каталог двухпараметрических дифференциальных моделей турбулентности [6,7], где основные модельные зависимости модифицируются дополнительными соотношениями и наборами констант.

Модель Ментера [8,9] является сочетанием сильных сторон k - ε и k - ω -моделей, поскольку первые модели лучше описывают свойства свободных сдвиговых течений, а модели типа k - ω имеют преимущества при моделировании пристеночных течений. Модель Ментера записывается путём суперпозиции k - ε и k - ω -моделей [8,9], помноженных соответственно на весовую функцию F_1 и $(1-F_1)$.

Функция F_1 конструируется таким образом, чтобы быть равной единице на верхней границе пристеночного слоя, в котором сосредоточено основное термическое сопротивление потока, и стремиться к нулю при приближении к стенке. Сшивка предполагается в области пристеночного слоя. Модель Ментера позволяет учесть влияние эффектов, имеющих место при малых скоростях движения теплоносителя, и кривизны линий тока на характеристики турбулентности.

Остановимся на основных аспектах вышеуказанной модели турбулентности. Базовая оригинальная k - ω -модель турбулентности выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} \frac{d\rho k}{dt} = \tau_{ij} \frac{\partial \overline{w_i}}{\partial x_j} - \beta^* \rho \omega k + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu + \sigma_{k1} \mu_T \frac{\partial k}{\partial x_j} \right]; \\ \frac{d\rho \omega}{dt} = \frac{\gamma_1}{\nu_T} \tau_{ij} \frac{\partial \overline{w_i}}{\partial x_j} - \beta_1 \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu + \sigma_{\omega1} \mu_T \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right], \end{cases} \quad (2)$$

где $\sigma_{k1}, \sigma_{\omega1}, \beta_1, \beta^*, \kappa, \gamma_1$ – набор констант для k - ω -модели, τ_{ij} – тензор Рейнольдсовых напряжений.

Трансформированная k - ε -модель записывается следующим образом:

$$\begin{cases} \frac{d\rho k}{dt} = \tau_{ij} \frac{\partial \overline{w_i}}{\partial x_j} - \beta^* \rho \omega k + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu + \sigma_{k2} \mu_T \frac{\partial k}{\partial x_j} \right]; \\ \frac{d\rho \omega}{dt} = \frac{\gamma_2}{\nu_T} \tau_{ij} \frac{\partial \overline{w_i}}{\partial x_j} - \beta_2 \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu + \sigma_{\omega2} \mu_T \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \\ + 2\rho \sigma_{\omega2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, \end{cases} \quad (3)$$

где $\sigma_{k2}, \sigma_{\omega2}, \beta_2, \beta^*, \kappa, \gamma_2$ – набор констант для k - ε -модели,

Для вывода окончательных соотношений первое и второе уравнения систем (2) и (3) умножим на F_1 и $(1-F_1)$ соответственно. После этого соответствующие уравнения систем (2) и (3) суммируются.

В результате получим систему исходных уравнений модели Ментера:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{d\rho k}{dt} &= \tau_{ij} \frac{\partial \overline{w_i}}{\partial x_j} - \beta^* \rho \omega k + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu + \sigma_k \mu_T \frac{\partial k}{\partial x_j} \right]; \\ \frac{d\rho \omega}{dt} &= \frac{\gamma}{\nu_T} \tau_{ij} \frac{\partial \overline{w_i}}{\partial x_j} - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu + \sigma_{\omega 2} \mu_T \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \\ &+ 2(1 - F_1) \rho \sigma_{\omega} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}. \end{aligned} \right. \quad (4)$$

Набор констант базовой оригинальной модели $k-\omega$ (система (2)) обозначим обобщённым параметром ϕ_1 , а аналогичный набор констант трансформированной модели $k-\varepsilon$ (система (3)) — обобщённым параметром ϕ_2 , имеем в уравнениях системы (4):

$$\phi = F_1 \phi_1 + (1 - F_2) \phi_2. \quad (5)$$

Для расчётов используются следующие две системы констант.

Система констант Вилкокса, обладающая высокой приемлемостью для пристеночных течений [6,7]:

$$\sigma_{k1} = 0,5; \quad \sigma_{\omega 1} = 0,5; \quad \beta_1 = 0,0750; \quad \beta^* = 0,09; \quad \kappa = 0,41; \quad \gamma_1 = \frac{\beta_1}{\beta^*} - \frac{\sigma_{\omega 1} \kappa^2}{\sqrt{\beta^*}}. \quad (6)$$

Стандартная $k-\varepsilon$ система констант, обладающая высокой приемлемостью для свободных сдвиговых слоёв [6,7]:

$$\sigma_{k2} = 1,0; \quad \sigma_{\omega 2} = 0,856; \quad \beta_2 = 0,0828; \quad \beta^* = 0,09; \quad \kappa = 0,41; \quad \gamma_2 = \frac{\beta_2}{\beta^*} - \frac{\sigma_{\omega 2} \kappa^2}{\sqrt{\beta^*}}. \quad (7)$$

Модель замыкается выражением для вихревой вязкости:

$$\nu_T = k / \omega. \quad (8)$$

Тензор рейнольдсовых напряжений имеет следующие составляющие:

$$\tau_{ij} = \mu_T \left(\frac{\partial \overline{w_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{w_j}}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial \overline{w_k}}{\partial x_k} \sigma_{ij} \right) - \frac{2}{3} \rho k \sigma_{ij}. \quad (9)$$

В заключении следует определить связующую функцию F_1 , после чего вывод модели будет полностью завершён. Вблизи стенки связующая функция F_1 должна быть близка к единице в значительной пристенного слоя, чтобы сохранить желательные черты $k-\omega$ -модели. По мере отхода от стенки и приближения к границе пристенного слоя связующая функция F_1 стремится к нулю для обеспечения независимости от внешних условий, что характерно для $k-\varepsilon$ -модели. Оптимальный вид связующей функции имеет следующий вид [6]:

$$F_1 = \tanh \left\langle \left(\min \left\{ \max \left[\frac{\sqrt{k}}{0,09 \omega y}; \frac{500 \nu}{y^2 \omega} \right]; \frac{4 \rho \sigma_{\omega 2} k}{\max \left[2 \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}; 10^{-20} \right] y^2} \right\} \right)^4 \right\rangle. \quad (10)$$

Данные про управляющие уравнения и оптимальные граничные условия можно почерпнуть в работе [10]. Применяются процедуры для коррекций давлений и для коррекций средне-массовых температур, которые основываются на периодичности оригинальных граничных условиях. Методологии для решений относительно основополагающих уравнений базируются на процедуре коррекций давлений, которые основываются на схематичном расщеплении по различным физическим процессам. Методические подосновы перспективных расчётных инструментов – это многоблочно-вычислительная технология, которая базируется на применении

пересекающейся разномасштабной структурированной сетки, связанной с восприятием специфических элементов структур смерчевых (вихревых) течений и распределением температурных полей, обеспечивающая необходимую точность и повышенную эффективность, что сравнимо с применением адаптивной сетки.

Аналогичные многочисленные исследования интенсифицированного теплообмена в трубе и канале с турбулизаторами для меньших критериев Рейнольдса были выполнены в [20-29].

Первостепенное внимание необходимо обратить как на местные, так и осреднённые параметры, относящиеся к конвективной теплоотдаче, включая в себя составляющие (профили) скоростей, потери на прокачку теплоносителя, среднюю по выделенным площадкам участков канальных стенок теплоотдачу; расчётным результатам в отношении турбулентных характеристик в членах в уравнениях для пульсационной турбулентной энергии (конвективный перенос, генерация, диффузионный перенос, диссипация,). В системах при внешнем (наружном) обтекании с прямоугольными (квадратными) выступами аналогичный способ ранее применялся, например, в исследовании [11].

В общем виде, основной задачей для настоящей статьи является: на базе анализа относительно вихревых зон в канальных системах с треугольными и квадратными турбулизаторами выявить уровень относительной интенсификации теплообмена для повышенных ($Re=10^6$) критериях Рейнольдса. Для цели оптимального применения отрывной зоны возникает необходимость знания механизма её взаимодействия с основными турбулентными потоками, а также механизмы процессов непосредственно в отрывных зонах, которые являются весьма сложными. В качественном отношении на базе экспериментального материала эти процессы были выявлены в следующей степени: есть возможность целенаправленного использования вихревых зон для интенсифицирования теплоотдачи в каналах [5, 6].

В статье исследуются преимущественно интересные случаи для использования расположенных периодически и поверхностным образом выступов квадратных и треугольных профильных сечений в круглых и прямых трубах, т.е. объект исследования [5, 6]; конкретно: $t/D=0,25...1,00$; $d/D=0,94...0,90$; $Re=10^5...10^6$; $Pr=0,72$; (d и D — меньший и больший внутренние диаметры труб с выступами соответственно; t — шаги между выступами).

Поперечные сечения и расчётная сетка для прямых и круглых прямых труб с выступами (рёбрами) с поверхностным и поперечным установлением для течений с квадратными, треугольными и полукруглыми поперечными профилями показаны на рис. 1. В данной статье были рассмотрены выступы квадратных и треугольных профильных сечений, т.к. именно эти выступы являются наиболее характерными при исследовании смерчевых (вихревых) зон в целях интенсифицирования теплоотдачи.

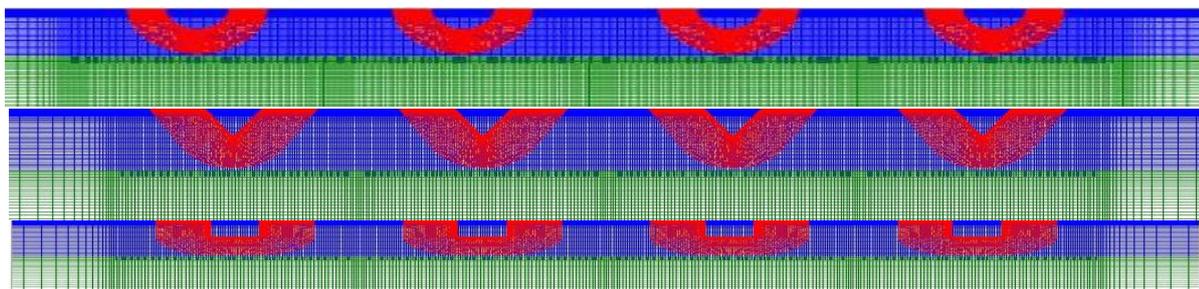


Рис. 1. Сетки труб, состоящие из количества секций с срединным расположенным полукруглых (верхний рисунок), треугольных (средний рисунок) и квадратных (нижний рисунок) турбулизаторов, входной и выходной участков которой гладкотрубные

Fig. 1. Grids of pipes, consisting of a number of sections with a middle located semicircular (top figure), triangular (middle figure) and square (bottom figure) turbulators, the inlet and outlet sections of which are smooth-tube

Обсуждение результатов. Проведено исследование структур для искусственно турбулизированных потоков в каналах с турбулизаторами квадратного и треугольного профилей для

высоких критериев Рейнольдса $Re=10^6$ и их относительными высотами $d/d=0,90...0,95$ и относительными шагами между ними $t/d=0,25...1,00$. В более ранних исследованиях (например, в [12, 13] и т.п.) в плане структуры потока были рассмотрены квадратные турбулизаторы с $d/D=0,94$ и $t/D=1,00$ при максимальном рассматриваемом числе Рейнольдса $Re=10^5$ как качественно характерные.

Для более высоких чисел Рейнольдса ($Re=10^6$) структура потока исследовалась для полукруглых турбулизаторов (например, в [14, 15] и т.п.). Для квадратных турбулизаторов аналогичные исследования были выполнены в работе [30]. Характер линий тока для квадратных и треугольных турбулизаторов будет качественно отличаться от полукруглых, следовательно, актуально исследование структуры потока для этих условий, основываясь на вышеупомянутых предыдущих расчётных работах, в которых были проанализированы структуры соответствующих вихревых зон. После вышеприведённого анализа следует перейти к сравнительному анализу вихревых зон для треугольных и квадратных турбулизаторов с прочими равными условиями, но для более высоких чисел Рейнольдса $Re=10^6$ и $Re=10^5$.

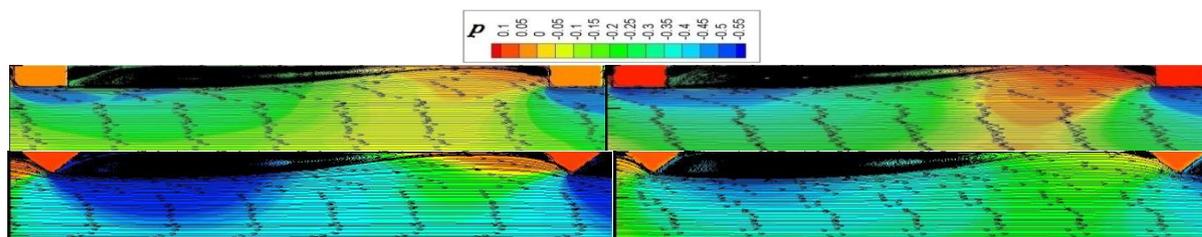


Рис. 2. Сравнение линий токов для трубы с турбулизаторами квадратными и треугольными поперечных сечений при $Re=10^5$ (верхние рисунки) и $Re=10^6$ (нижние рисунки); $d/D=0,95$; $t/D=0,25$ на воздухе
Fig. 2. Comparison of current lines for a pipe with turbulators of square and triangular cross-sections at $Re = 105$ (upper figures) and $Re = 106$ (lower figures); $d / D = 0.95$; $t / D = 0.25$ in air

Для этой цели на рис. 2 приведено сравнение линий токов для трубы с относительно низкими турбулизаторами треугольных и квадратных поперечного сечения при $Re=10^5$ (верхние рисунки) и $Re=10^6$ (нижние рисунки), $d/D=0,95$, $t/D=0,25$ для воздуха. Из рис. 2 хорошо видно, что точки присоединения для обоих случаев расположены примерно на одинаковых расстояниях от квадратного турбулизатора; для них главные вихри в обоих случаях сохраняют внешние размеры, но внутри главных вихрей происходит качественная деформация при наращивании критерия Рейнольдса с $Re=10^5$ до $Re=10^6$ (рис. 2).

Для треугольных турбулизаторов точки присоединения также расположены примерно на одном и том же расстоянии от турбулизаторов, но качественная деформация основного вихря ещё сильнее выражена, чем у квадратных турбулизаторов: он деформируется сильнее при наращивании критерия Рейнольдса с $Re=10^5$ до $Re=10^6$ (рис. 2) как в сторону ядра потока, так и направлении угловых вихрей.

Понятно, что деформация главного вихря в основной поток обуславливает повышенное гидросопротивление для треугольных турбулизаторов по отношению к квадратным. Деформация угловых вихрей: видно, что угловой вихрь после квадратного турбулизатора уменьшается с повышением числа Рейнольдса, т.е. имеет место выдавливание главным вихрем этого углового вихря в сторону стенки. Что касается углового вихря до квадратного турбулизатора, то он также уменьшается с увеличением числа Рейнольдса, но в меньшей мере; точка отрыва смещается с увеличением числа Рейнольдса несколько ближе к турбулизатору. Для треугольных турбулизаторов подобные тенденции ещё более выражены: угловые вихри уменьшаются ещё сильнее, особенно вихрь за треугольным турбулизатором. При приращении относительного шага между отдельными турбулизаторами квадратного профиля ($t/D=0,50$) имеет место (рис. 3) увеличение основного вихря в основной поток; точка присоединения для случаев с $Re=10^5$ и $Re=10^6$ находится приблизительно на том же расстоянии от турбулизатора. Для треугольных турбулизаторов подобная тенденция сохраняется (рис. 3).

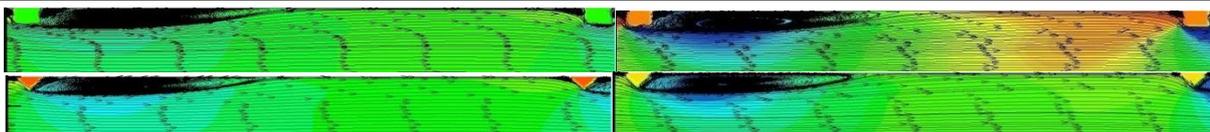


Рис. 3. Сравнение линий токов для трубы с турбулизаторами квадратных и треугольных поперечных сечений при $Re=10^5$ (левые рисунки) и $Re=10^6$ (правые рисунки); $d/D=0,95$; $t/D=0,50$ на воздухе

Fig. 3. Comparison of current lines for a pipe with turbulators of square and triangular cross-sections at $Re = 105$ (left figures) and $Re = 106$ (right figures); $d / D = 0.95$; $t / D = 0.50$ in air

Вихрь над квадратным турбулизатором при приращении критерия Рейнольдса сдвигается против течения, что и обуславливает больший выход главного вихря в основной поток. Угловой вихрь до квадратного турбулизатора при приращении критерия Рейнольдса до $Re=10^6$ становится уже значительно меньшим, чем для случая с $Re=10^5$, а точка отрыва базируется заметно ближе к турбулизатору, даже в большей степени, чем для аналогичного случая с $t/D=0,50$. Для углового вихря после квадратного турбулизатора имеет место его уменьшение, а точка присоединения располагается ближе к турбулизатору приращению критерия Рейнольдса. Для треугольных турбулизаторов вышеуказанная тенденция даже усиливается, и угловые вихри выдавливаются основным вихрём в ещё большей степени, чем для квадратных турбулизаторов.

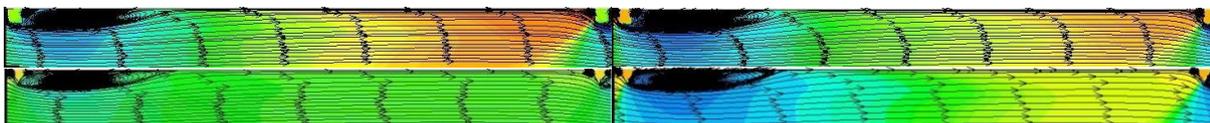


Рис. 4. Сравнение линий токов для трубы с турбулизаторами квадратных и треугольных поперечных сечений при $Re=10^5$ (левые рисунки) и $Re=10^6$ (правые рисунки); $d/D=0,95$; $t/D=1,00$ на воздухе

Fig. 4. Comparison of current lines for a pipe with turbulators of square and triangular cross-sections at $Re = 105$ (left figures) and $Re = 106$ (right figures); $d / D = 0.95$; $t / D = 1.00$ in air

Для бóльших относительных (безразмерных) шагов между турбулизаторами квадратного профиля на рис. 4. приведено сравнение по линиям токов для труб с относительно низкими турбулизаторами квадратного и треугольного поперечных сечений при $Re=10^5$ (верхние рисунки) и $Re=10^6$ (нижние рисунки), $d/D=0,95$, $t/D=1,00$ для воздуха. Как видно из рис. 4., что точки присоединения для обоих случаев расположены примерно на одинаковых расстояниях от треугольного и квадратного турбулизаторов, но главный вихрь будет деформироваться при приращении критериев Рейнольдса. При приращении критериев Рейнольдса до $Re=10^6$ основной вихрь будет смещаться в сторону ядра потока (рис. 4). До квадратного турбулизатора точка отрыва смещается в сторону течения, а высота углового вихря ещё больше уменьшается. Для треугольных турбулизаторов вышеуказанная тенденция только усиливается: точка отрыва располагается ещё ближе за турбулизатором, а высота вихря становится ещё меньше.

Угловой вихрь после квадратного турбулизатора ещё более выдавливается основным потоком к стенке при приращении критериев Рейнольдса. Вихрь над квадратным турбулизатором заметно смещается против течения, что приводит к тому, что главный вихрь больше выходит в сторону ядра потока - последнее обстоятельство обуславливает увеличение гидравлического сопротивления. Для турбулизаторов с треугольным поперечным профилем выдавливание основным вихрём углового вихря после турбулизатора становится ещё бóльшим. Выход главного вихря в ядра основных потоков при $Re=10^6$ для турбулизаторов треугольного профиля сравнимым с квадратными, поэтому и их гидравлические сопротивления становятся сравнимыми.

Сравнение по линиям токов для труб с относительно высокими турбулизаторами треугольного и квадратного поперечных сечений при $Re=10^5$ (верхние рисунки) и $Re=10^6$ (нижние рисунки), $d/D=0,90$, $t/D=0,25$ для воздуха приведено на рис. 5. Деформация главного вихря для квадратных турбулизаторов при приращении критериев Рейнольдса происходит также за счёт выдавливания углового вихря за турбулизатором.

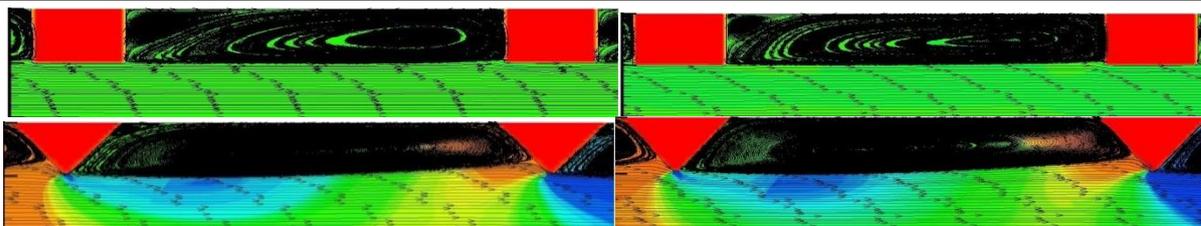


Рис. 5. Сравнение линий токов для труб с турбулизаторами квадратных и треугольных поперечных сечений при $Re=10^5$ (левые рисунки) и $Re=10^6$ (правые рисунки); $d/D=0,90$; $t/D=0,25$ на воздухе
Fig. 5. Comparison of current lines for pipes with turbulators of square and triangular cross-sections at $Re = 10^5$ (left figures) and $Re = 10^6$ (right figures); $d / D = 0.90$; $t / D = 0.25$ in air

Для более высоких квадратных турбулизаторов угловой вихрь достигает больших размеров, чем для низких; для турбулизаторов треугольного профиля вышеуказанная тенденция менее выражена (рис. 5).

Выдавливание основным вихрём угловых вихрей более выражено для высоких турбулизаторов, чем для низких - для треугольных турбулизаторов это ещё более выражено, чем для квадратных. Угловой вихрь до турбулизатора для высоких квадратных турбулизаторов выдавливается почти совсем, в отличие от низких; для треугольных турбулизаторов это выдавливание выражено ещё сильнее. Над квадратным турбулизатором не возникает вихрей, как для малых, так и для больших турбулизаторов. Присоединение основного вихря к последующему треугольному турбулизатору происходит гораздо ближе к стенке, чем у квадратных турбулизаторов, у которых это присоединение расположено почти в верхней точке последующего квадратного турбулизатора.

При наращивании относительных (безразмерных) шагов между турбулизаторами ($t/D=0,50$) для высоких квадратных турбулизаторов также имеет место (рис. 6) увеличение основного вихря в основной поток, и точка присоединения для случаев с $Re=10^5$ и $Re=10^6$ находится приблизительно на том же расстоянии от турбулизатора. Для турбулизаторов треугольного профиля данная тенденция сохраняется (рис. 6).

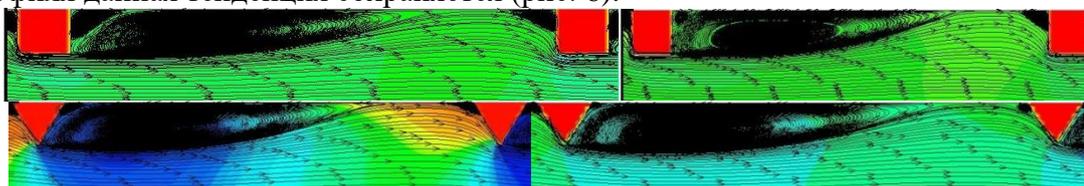


Рис. 6. Сравнение линий токов для трубы с турбулизаторами квадратных и треугольных поперечных сечений при $Re=10^5$ (левые рисунки) и $Re=10^6$ (правые рисунки); $d/D=0,90$; $t/D=0,50$ на воздухе.
Fig. 6. Comparison of current lines for a pipe with turbulators of square and triangular cross-sections at $Re = 10^5$ (left figures) and $Re = 10^6$ (right figures); $d / D = 0.90$; $t / D = 0.50$ in air

Угловой вихрь за квадратным турбулизатором деформируется в значительной степени при приращении критериев Рейнольдса, а точка отрыва расположена гораздо ближе к квадратному турбулизатору, а вихрь над квадратным турбулизатором почти не наблюдается. Для треугольных турбулизаторов угловой вихрь за турбулизатором при приращении критерия Рейнольдса уменьшается очень значительно, гораздо сильнее, чем для квадратных турбулизаторов.

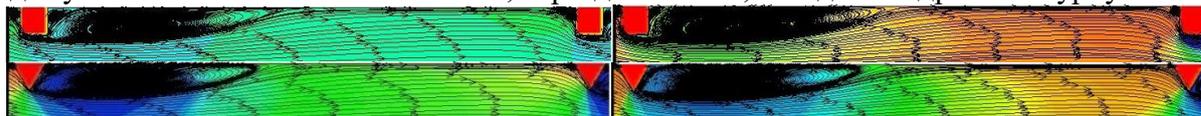


Рис. 7. Сравнение линий токов для трубы с турбулизаторами квадратных и треугольных поперечных сечений при $Re=10^5$ (левые рисунки) и $Re=10^6$ (правые рисунки); $d/D=0,90$; $t/D=1,00$ на воздухе
Fig.7. Comparison of current lines for pipes with turbulators of square and triangular cross-sections at $Re = 10^5$ (left figures) and $Re = 10^6$ (right figures); $d / D = 0.90$; $t / D = 1.00$ in air

Вышесказанное не увеличивает гидравлического сопротивления в случае квадратных турбулизаторов, в отличие от случая, когда вихрь над турбулизатором генерируется. Угловой вихрь до квадратного турбулизатора незначительно уменьшается, но точка отрыва располагает-

ся заметно ближе в сторону потока при приращении критериев Рейнольдса. Для турбулизаторов треугольного профиля эта тенденция ещё сильнее проявляется: угловой вихрь до треугольного турбулизатора уменьшается значительно, а точка отрыва располагается ещё ближе в сторону направления потока, чем для турбулизаторов квадратного профиля.

Для больших относительных (безразмерных) шагов между относительно высокими турбулизаторами треугольного и квадратного поперечных сечений были рассчитаны линии тока для труб при $Re=10^5$ и $Re=10^6$, $d/D=0,90$, $t/D=1,00$ для воздуха. Здесь также имеет место деформация главного вихря при приращении критериев Рейнольдса по причине выдавливания углового вихря за квадратным турбулизатором. Для треугольных турбулизаторов это выдавливание ещё более усиливается - при $Re=10^6$ углового вихря вообще не наблюдается. Расчётные точки присоединений потоков за квадратным турбулизатором для случая с более высокими числами Рейнольдса уже будут располагаться определённо ближе к турбулизатору, чем для случая с меньшими числами Рейнольдса, т.е. будут смещаться против направления течения, что приводит к снижению интенсификации теплообмена. Для треугольных турбулизаторов вышеуказанная тенденция сохранится. Угловой вихрь за квадратным турбулизатором при больших числах Рейнольдса значительно меньше, чем при меньших, что обусловлено его выдавливанием за счёт основного течения. Кроме того, точка присоединения углового вихря за квадратным турбулизатором также ощутимо смещается против направления основного течения, что несколько увеличивает гидросопротивление. За треугольным турбулизатором угловой вихрь при приращении критериев Рейнольдса до $Re=10^6$ вообще нивелируется, т.е. выдавливается практически полностью основным вихрём, что несколько снижает гидросопротивление.

Вихрь над квадратным турбулизатором несколько увеличивается в размерах, немного сдвигается против направления течения и распространяется в сторону ядра потока, что обуславливает ощутимое увеличение гидравлического сопротивления. Для турбулизаторов треугольных поперечных профилей при приращении критериев Рейнольдса вплоть до $Re=10^6$ происходит большее внедрение главного вихря в ядро течения, линии тока располагаются под большим углом к оси потока, что увеличивает гидросопротивление канала. Следовательно, на основе анализа линий тока можно резюмировать, что при больших числах Рейнольдса $Re=10^6$ и $d/D=0,95...0,90$ и $t/D=0,25...1,0$ для квадратных турбулизаторов, в отличие от полукруглых [14-19], увеличение относительной интенсификации теплообмена довольно невелико, поскольку имеет место смещение точки отрыва против течения, и сопровождается оно сравнительно масштабным ростом гидравлического сопротивления, вследствие того, что главный вихрь значительно деформируется и распространяется в ядро потока, в том числе, за счёт увеличения вихря над турбулизатором. Для треугольных турбулизаторов вышеуказанная тенденция сохранится, но в меньшей степени, чем для квадратных турбулизаторов, т.е. треугольные турбулизаторы в этом смысле будут занимать промежуточное положение между полукруглыми и квадратными турбулизаторами.

Определено влияние структур с вихревыми зонами между периодическими турбулизаторами потока и поверхностным расположением квадратного и треугольного поперечных профилей на интегральные (осреднённые) характеристики потока и теплообмена ($Re=10^6$; $d/D=0,90...0,95$; $t/D=0,25...1,00$).

В результате проведённых численных расчётов ранее были получены локальные (местные) и осреднённые (интегральные) характеристики течения и теплообмена в прямых круглых горизонтальных трубах с турбулизаторами квадратных и треугольных поперечных профилей [1-9] для чисел Рейнольдса $Re \leq 10^5$. Основной целью данной работы является выявление тех аспектов, которые ещё не были ранее раскрыты для чисел Рейнольдса вплоть до $Re \leq 10^6$. Как показали расчёты, относительная интенсификация теплообмена $Nu/Nu_{гд}$ для круглых и прямых труб с относительно низкими квадратными турбулизаторами для $d/D=0,95$, $t/D=0,25$ при $Re=10^6$ практически на 5,6% выше, чем при $Re=10^5$ с прочими равными условиями; для $t/D=0,50$ этот относительный интенсифицированный теплообмен выше примерно на 4,6%; для $t/D=1,00$ данное увеличение относительного теплообмена ещё меньше и составляет всего порядка 3,7%. Для

треугольных турбулизаторов данные показатели составляют соответственно: 4,1%, 3,5% и 3,1%, т.е. оно определённо ниже, чем для квадратных турбулизаторов.

Расчётная, относительная интенсификация теплообмена $Nu/Nu_{ГЛ}$ для круглых и прямых труб с относительно высокими квадратными турбулизаторами для $d/D=0,90$, $t/D=0,25$ при $Re=10^6$ практически на 3,1% выше, чем при $Re=10^5$ с прочими равными условиями; для $t/D=0,50$ этот относительный интенсифицированный теплообмен выше примерно на 2,4%; для $t/D=1,00$ данное увеличение относительного теплообмена ещё меньше и составляет всего порядка 1,7%. Для треугольных турбулизаторов данные показатели составляют соответственно: 3,1%, 1,7% и 0,2%, т.е. оно определённо ниже, чем для квадратных турбулизаторов, причём оно ещё ниже соответствующих показателей для относительно низких турбулизаторов. Вышеуказанные параметры интенсификации теплообмена для квадратных турбулизаторов определённо меньше, чем для полукруглых турбулизаторов [14, 19]); для треугольных турбулизаторов эти параметры ещё ниже, несмотря на то, что по отношению к гладкой трубе с прочими равными условиями оносительный теплообмен будет больше.

Таким образом, для рассматриваемых условий для квадратных турбулизаторов ($Pr=0,72$, $Re \leq 10^6$, $d/D=0,95...0,90$, $t/D=0,25...1,00$) увеличение относительного интенсифицированного теплообмена $Nu/Nu_{ГЛ}$ при увеличении числа Рейнольдса с $Re=10^5$ до $Re=10^6$ с прочими равными условиями относительно невелико, в особенности для открытых впадин (классификация, сгенерированная в работах [4, 7-9, 12, 13]) при $t/D=1,00$. Для треугольных турбулизаторов вышеуказанная тенденция сохраняется, но показатели $(Nu/Nu_{ГЛ})|_{Re=10^6}$ для треугольных турбулизаторов несколько выше, чем для квадратных турбулизаторов.

Как видно из вышепредставленных картин вихревых зон для турбулизаторов данного вида, превалирование переноса импульса над переносом теплоты при больших числах Рейнольдса $Re=10^6$ довольно велико, поскольку возвратные течения довольно существенны, имеет место выход главного вихря в ядра потоков, что значительно увеличивает гидравлическое сопротивление. Для треугольных турбулизаторов вышеуказанная тенденция менее выражена, чем для квадратных турбулизаторов: возвратные течения менее выражены, могут даже практически полностью выдавливаться; выход главного вихря в ядра потоков тоже довольно существенный, что также обуславливает высокое гидросопротивление.

Следовательно, на основе анализа вихревых (смерчевых) зон между турбулизаторами квадратных и треугольных профилей было показано, что для более высоких квадратных турбулизаторов и при более высоких числах Рейнольдса незначительное возрастание относительного критерия Нуссельта $Nu/Nu_{ГЛ}$ сопровождается значительным повышением относительного гидросопротивления по причине очень значительного влияния возвратных течений, которые могут натекать непосредственно на сам турбулизатор в тем большей степени, чем выше число Рейнольдса; для треугольных турбулизаторов вышеуказанная тенденция сохраняется и даже углубляется.

Вывод. В статье были проведены результаты математического моделирования теплообменного процесса в прямых и круглых горизонтальных трубах с турбулизаторами с $d/D=0,95...0,90$ и $t/D=0,25...1,00$ треугольных и квадратного поперечных профилей при больших числах Рейнольдса ($Re=10^6$) на фундаменте с многоблочно-вычислительными технологиями, которые основаны на решениях посредством конечно-объёмной и факторизованной процедуре уравнений Рейнольдса, а тжке уравнений энергии.

Установлено, что относительная интенсификация теплообмена $[(Nu/Nu_{ГЛ})|_{Re=10^6}]/[(Nu/Nu_{ГЛ})|_{Re=10^5}]$ в круглых трубах с квадратными турбулизаторами на воздухе для больших чисел Рейнольдса ($Re=10^6$), что вполне может быть актуально в применяемых в теплообменниках каналах, может быть выше при масштабном приращении гидравлического сопротивления, чем для немного меньших чисел ($Re=10^5$), для относительно высоких турбулизаторов потока $d/D=0,90$ для всего рассматриваемого диапазона для параметра безразмерных шагов между ними $t/D=0,25...1,00$ немногим более 3%; для турбулизаторов треугольных поперечных профилей аналогичные показатели примерно такие же. При более низких квадратных турбули-

заторах с $d/D=0,95$ данное увеличение относительного теплообмена для больших чисел Рейнольдса ($Re=10^6$) сравнительно с меньшими числами ($Re=10^5$) не превышает 6%; для турбулизаторов треугольных поперечных профилей аналогичные показатели составляют немногим более 4%. Для всего рассматриваемого исследуемого диапазона относительная интенсификация выше для малых шагов, чем для больших при аналогичных одинаковых условиях как для квадратных, так и для треугольных турбулизаторов.

Библиографический список:

1. Дрейцер Г.А., Исаев С.А., Лобанов И.Е. Расчет конвективного теплообмена в трубе с периодическими выступами // Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках: Труды XIV Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И.Леонтьева. М.: МЭИ, 2003. Т.1. С. 57—60.
2. Дрейцер Г.А., Исаев С.А., Лобанов И.Е. Расчет конвективного теплообмена в трубе с периодическими выступами // Вестник МАИ. 2004. Т. 11. № 2. С. 28—35.
3. Дрейцер Г.А., Исаев С.А., Лобанов И.Е. Расчет конвективного теплообмена в трубе с периодически расположенными поверхностными турбулизаторами потока // Теплофизика высоких температур. 2005. Т. 43. № 2. С. 223230.
4. Лобанов И.Е. Математическое моделирование интенсифицированного теплообмена при турбулентном течении в каналах: Дисс. на соиск. ученой степени докт. техн. наук. М., 2005. 632 с.
5. Калинин Э.К., Дрейцер Г.А., Ярхо С.А. Интенсификация теплообмена в каналах. М.: Машиностроение, 1990. 208 с.
6. Эффективные поверхности теплообмена / Э.К.Калинин, Г.А.Дрейцер, И.З. Копп и др. М.: Энергоатомиздат, 1998. 408 с.
7. Лобанов И.Е., Штейн Л.М. Перспективные теплообменные аппараты с интенсифицированным теплообменом для металлургического производства. (Общая теория интенсифицированного теплообмена для теплообменных аппаратов, применяемых в современном металлургическом производстве.) В 4-х томах. Том I. Математическое моделирование интенсифицированного теплообмена при турбулентном течении в каналах с применением основных аналитических и численных методов. М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2009. 405 с.
8. Лобанов И.Е., Штейн Л.М. Перспективные теплообменные аппараты с интенсифицированным теплообменом для металлургического производства. (Общая теория интенсифицированного теплообмена для теплообменных аппаратов, применяемых в современном металлургическом производстве.) В 4-х томах. Том II. Математическое моделирование интенсифицированного теплообмена при турбулентном течении в каналах с применением неосновных аналитических и численных методов. М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2010. 290 с.
9. Лобанов И.Е., Штейн Л.М. Перспективные теплообменные аппараты с интенсифицированным теплообменом для металлургического производства. (Общая теория интенсифицированного теплообмена для теплообменных аппаратов, применяемых в современном металлургическом производстве.) В 4-х томах. Том III. Математическое моделирование интенсифицированного теплообмена при турбулентном течении в каналах с применением многослойных, супермногослойных и композитных моделей турбулентного пограничного слоя. М.: МГАКХиС, 2010. 296 с.
10. Численное моделирование вихревой интенсификации теплообмена в пакетах труб / Ю.А.Быстров, С.А.Исаев, Н.А.Кудрявцев, А.И.Леонтьев. СПб: Судостроение, 2005. 398 с.
11. Ashrafian A., Andersson H.I. Roughness Effects in Turbulent Channel Flow // Turbulence, Heat Transfer and Mass Transfer 4. — New York, Wellington (UK): Begell House Inc., 2003. pp. 425—432.
12. Лобанов И.Е. Теоретическое исследование структуры вихревых зон между периодическими, поверхностно расположенными турбулизаторами потока прямоугольного поперечного сечения // Известия вузов. Авиационная техника. 2011. № 4. С. 64-66.
13. Лобанов И.Е. Моделирование структуры вихревых зон между периодическими поверхностно расположенными турбулизаторами потока прямоугольного поперечного сечения // Математическое моделирование. 2012. Т. 24. № 7. С. 45-58.
14. Лобанов И.Е. Математическое моделирование теплообмена в трубах с турбулизаторами, а также в шероховатых трубах, на воздухе при больших числах Рейнольдса // Отраслевые аспекты технических наук. 2013. № 9. С. 8—18.
15. Лобанов И.Е. Математическое моделирование теплообмена и потока в круглых трубах с относительно высокими выступами полукруглого поперечного сечения при течении воздуха при больших числах Рейнольдса // Электронный периодический рецензируемый научный журнал "SCI-ARTICLE.RU". 2019. № 71 (июль). С. 63—76.
16. Лобанов И.Е. Математическое моделирование теплообмена в трубах с турбулизаторами, а также в шероховатых трубах, на воздухе при больших числах Рейнольдса // Отраслевые аспекты технических наук. 2013. № 9. С. 818.
17. Лобанов И.Е. Теоретическое математическое моделирование течения и теплообмена в прямых круглых трубах с турбулизаторами полукруглого поперечного сечения, а также в шероховатых трубах, на воздухе при больших числах Рейнольдса // Веб-портал профессионального сетевого педагогического сообщества "Ped-library.ru". 2019. Режим доступа: <https://ped-library.ru/1548529792>.
18. Лобанов И.Е. Математическое низкорейнольдсовое моделирование теплообмена в трубах с турбулизаторами на воздухе при больших числах Рейнольдса // Инновационные подходы в отраслях и сферах. 2019. Том № 4. Выпуск № 2 (февраль, 2019).
19. Лобанов И.Е. Теория теплообмена в трубах с турбулизаторами при $d/D=0,95\div 0,90$ и $t/D=0,25\div 1,00$, а также в шероховатых трубах, на воздухе при больших числах Рейнольдса $Re=1000000$ // Веб-портал профессионального сетевого педагогического сообщества "Ped-library.ru". 2019. Режим доступа: <https://ped-library.ru/1561232054>.
20. Менялкина Е.Н. Исследование влияния формы оребрения на динамику потока и сопротивление канала // Альманах современной науки и образования. 2017. № 4—5 (118). С. 65—68.
21. Manca O., Nardini S., Ricci D. Numerical Analysis of Water Forced Convection in Channels with Differently Shaped Transverse Ribs // Journal of Applied Mathematics. 2011. DOI: 10.1155/2011/323485.
22. Tong-Miin Liou, Hwang J.J., Chen S.H. Simulation and measurement of enhanced turbulent heat transfer in a channel with periodic ribs on one principal wall // International Journal of Heat and Mass Transfer. 1993. № 36(2). pp. 507—517. DOI: 10.1016/0017-9310(93)80025-P.
23. Ricci D., Manca O., Manca S., Nardini S. Two-Dimensional Numerical Investigation on Forced Convection in Channels With Transversal Ribs // Conference: ASME 2009 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, IMECE2009. 2009. DOI: 10.1115/IMECE2009-11203.
24. Chaube A., Sahu P.K., Solanki S.C., Sharma P.B. Effect of Artificial Roughness on Convective Heat Transfer // 40th Thermophysics Conference. 2008. DOI: 10.2514/6.2008-3810.
25. Ahn S.W., Son K.P. An investigation on friction factors and heat transfer coefficients in a rectangular duct with surface roughness // KSME International Journal. 2002. № 16(4). pp. 549—556.
26. Kant K., Qayoum A. Numerical investigations of fluid flow and heat transfer in a ribbed heated duct with variable aspect ratios // Recent Trends in Fluid Mechanics. 2016. V. 3. Iss. 1. pp. 23—37.
27. Kim J.-H., Heo Sung-Hoo J.-N., Jeeyoung S. Numerical analysis on heat transfer and pressure drop characteristics in a horizontal channel

- with various ribs // DOI: 10.5916/jkosme.2013.37.1.40.
28. Smith E., Wayo C. Analysis of turbulent heat transfer and fluid flow in channels with various ribbed internal surfaces // *Journal of Thermal Science*. 2011. № 20(3). pp. 260-267. DOI: 10.1007/s11630-011-0468-3.
29. Naveen S., Andallib T., Manish M. Experimental Investigation of Heat Transfer Enhancement in Rectangular Duct with Pentagonal Ribs // *Heat Transfer Engineering*. 2017. DOI: 10.1080/01457632.2017.1421135.
30. Лобанов И.Е. Математическое моделирование теплообмена в трубах с квадратными турбулизаторами при $d/D=0,95\div 0,90$ и $t/D=0,25\div 1,00$ на воздухе при больших числах Рейнольдса $Re=1000000$ // Веб-портал профессионального сетевого педагогического сообщества "Ped-library.ru". 2019. Режим доступа: <https://ped-library.ru/1572707532>.

References:

1. Dreytser G.A., Isayev S.A., Lobanov I.Ye. Raschet konvektivnogo teploobmena v trube s periodicheskimi vystupami // *Problemy gazodinamiki i teploobmena v energeticheskikh ustanovkakh: Trudy XIV Shkoly-seminara molodykh uchenykh i spetsialistov pod rukovodstvom akademika RAN A.I.Leont'yeva*. M.: MEL, 2003. T.1. S. 57—60. [Dreytser G.A., Isaev S.A., Lobanov I.E. Calculation of convective heat transfer in a pipe with periodic protrusions // *Problems of gas dynamics and heat and mass transfer in power plants: proceedings of the XIV of the School-seminar of young scientists and specialists under the leadership of academician A. I. Leontiev*. M.: MPEI, 2003. V. 1. pp 57—60. (In Russ)]
2. Dreytser G.A., Isayev S.A., Lobanov I.Ye. Raschet konvektivnogo teploobmena v trube s periodicheskimi vystupami // *Vestnik MAI*. 2004. T. 11. № 2. S. 28—35. [Dreytser G.A., Isaev S.A., Lobanov I.E. Calculation of convective heat transfer in a pipe with periodic protrusions // *Vestnik MAI*. – 2004. V. 11. № 2. pp. 28—35. (In Russ)]
3. Dreytser G.A., Isayev S.A., Lobanov I.Ye. Raschet konvektivnogo teploobmena v trube s periodicheskimi raspolozhennymi poverkhnostnymi teploobmennymi potokami // *Teplofizika vysokikh temperatur*. 2005. T. 43. № 2. S. 223-230. [Dreytser G.A., Isaev S.A., Lobanov I.E. Calculation of convective heat transfer in a pipe with periodically located surface flow turbulators // *Thermophysics of high temperatures*. 2005. V. 43. № 2. pp. 223—230. (In Russ)]
4. Lobanov I.Ye. Matematicheskoye modelirovaniye intensifitsirovannogo teploobmena pri turbulentnom techenii v kanalakh: Diss. na soisk. uchenoy stepeni dokt. tekhn. nauk. M., 2005. 632 s [Lobanov I.E. Mathematical modeling of intensified heat transfer under turbulent flow in channels: Diss. on the screen. Doctor of Science degree. tech. sc. M., 2005. 632 p. (In Russ)]
5. Kalinin E.K., Dreytser G.A., Yarkho S.A. Intensifikatsiya teploobmena v kanalakh. M.: Mashinostroyeniye, 1990. 208 s. [Kalinin E.K., Dreytser G.A., Yarkho S.A. Intensification of heat transfer in channels. M.: Mashinostroyeniye, 1990. 208 p. (In Russ)]
6. Effektivnyye poverkhnosti teploobmena / E.K.Kalinin, G.A.Dreytser, I.Z.Kopp et al. M.: Energoatomizdat, 1998. 408 s. [Effective heat transfer surfaces / E.K.Kalinin, G.A.Dreytser, I.Z.Kopp et al. M.: Energoatomizdat, 1998. 408 p. (In Russ)]
7. Lobanov I.Ye., Shteyn L.M. Perspektivnyye teploobmennyye apparaty s intensifitsirovannym teploobmenom dlya metallurgicheskogo proizvodstva. (Obshchaya teoriya intensifitsirovannogo teploobmena dlya teploobmennyykh apparatov, primenyayemykh v sovremennom metallurgicheskoye proizvodstve.) V 4-kh tomakh. Tom I. Matematicheskoye modelirovaniye intensifitsirovannogo teploobmena pri turbulentnom techenii v kanalakh s primeneniyyem osnovnykh analiticheskikh i chislennykh metodov. M.: Izdatel'stvo Assotsiatsii stroitel'nykh vuzov, 2009. 405 s. [Lobanov I.E., Stein L.M. Perspective heat exchangers with intensified heat exchange for metallurgical production. (General theory of intensified heat transfer for heat exchangers used in modern metallurgical production.) In 4 volumes. Volume I. Mathematical modeling of intensified heat transfer in turbulent flow in channels with the use of basic analytical and numerical methods. M.: Publishing House of the Association of Construction Universities, 2009. 405 p. (In Russ)]
8. Lobanov I.Ye., Shteyn L.M. Perspektivnyye teploobmennyye apparaty s intensifitsirovannym teploobmenom dlya metallurgicheskogo proizvodstva. (Obshchaya teoriya intensifitsirovannogo teploobmena dlya teploobmennyykh apparatov, primenyayemykh v sovremennom metallurgicheskoye proizvodstve.) V 4-kh tomakh. Tom II. Matematicheskoye modelirovaniye intensifitsirovannogo teploobmena pri turbulentnom techenii v kanalakh s primeneniyyem osnovnykh analiticheskikh i chislennykh metodov. M.: Izdatel'stvo Assotsiatsii stroitel'nykh vuzov, 2010. 290 s. [Lobanov I.E., Stein L.M. Perspective heat exchangers with intensified heat exchange for metallurgical production. (General theory of intensified heat transfer for heat exchangers used in modern metallurgical production.) In 4 volumes. Volume II. Mathematical modeling of intensified heat transfer in turbulent flow in channels using non-basic analytical and numerical methods. M.: Publishing House of the Association of Construction Universities, 2010. 290 p. (In Russ)]
9. Lobanov I.Ye., Shteyn L.M. Perspektivnyye teploobmennyye apparaty s intensifitsirovannym teploobmenom dlya metallurgicheskogo proizvodstva. (Obshchaya teoriya intensifitsirovannogo teploobmena dlya teploobmennyykh apparatov, primenyayemykh v sovremennom metallurgicheskoye proizvodstve.) V 4-kh tomakh. Tom III. Matematicheskoye modelirovaniye intensifitsirovannogo teploobmena pri turbulentnom techenii v kanalakh s primeneniyyem mnogoslonykh, supermnogoslonykh i kompaundnykh modeley turbulentnogo pogranichnogo sloya. M.: MGAKHiS, 2010. 296 s. [Lobanov I. E., Stein L. M. Perspective heat exchangers with intensified heat exchange for metallurgical production. (General theory of intensified heat transfer for heat exchangers used in modern metallurgical production.) In 4 volumes. Volume III. Mathematical modeling of intensified heat transfer in turbulent flow in channels with the use of multilayer, super-multilayer and compound models of a turbulent boundary layer. M.: MGAKHiS, 2010. 296 p. (In Russ)]
10. Chislennoye modelirovaniye vikhrevoy intensifikatsii teploobmena v paketakh trub / YU.A.Bystrov, S.A.Isayev, H.A.Kudryavtsev, A.I.Leont'yev. SPb: Sudostroyeniye, 2005. 398 s. [Numerical simulation of vortex heat transfer intensification in pipe packages / Yu.A.Bystrov, S.A.Isayev, N.A.Kudryavtsev, A.I.Leontiev. St. Petersburg: Sudostroyeniye, 2005. 398 p. (In Russ)]
11. Ashrafian A., Andersson H.I. Roughness Effects in Turbulent Channel Flow // *Turbulence, Heat Transfer and Mass Transfer 4*. New York, Wellington (UK): Begell House Inc., 2003. pp. 425—432.
12. Lobanov I.Ye. Teoreticheskoye issledovaniye struktury vikhrevykh zon mezhduraznitsami periodicheskimi, poverkhnostno raspolozhennymi turbulatorami potoka pryamougol'nogo poperechnogo secheniya // *Izvestiya vuzov. Aviatcionnaya tekhnika*. 2011. № 4. S. 64—66. [Lobanov I.E. Theoretical study of the structure of vortex zones between periodic, surface-located flow turbulators of rectangular cross-section // *Izvestiya vuzov. Aviation equipment*. 2011. № 4. pp. 64—66. (In Russ)]
13. Lobanov I.Ye. Modelirovaniye struktury vikhrevykh zon mezhduraznitsami periodicheskimi poverkhnostno raspolozhennymi turbulatorami potoka pryamougol'nogo poperechnogo secheniya // *Matematicheskoye modelirovaniye*. 2012. T. 24. № 7. S. 45—58. [Lobanov I.E. Modeling of the structure of vortex zones between periodic surface-located flow turbulators of rectangular cross-section // *Mathematical modeling*. 2012. V. 24. № 7. pp. 45—58. (In Russ)]
14. Lobanov I.Ye. Matematicheskoye modelirovaniye teploobmena v trubakh s turbulatorami, a takzhe v sheroxovatykh trubakh, na vozdukh pri bol'shikh chislakh Reynol'dsa // *Otraslevyye aspekty tekhnicheskikh nauk*. 2013. № 9. S. 8—18. [Lobanov I.E. Mathematical modeling of heat transfer in pipes with turbulators, as well as in rough pipes, in the air at large Reynolds numbers // *Branch aspects of technical sciences*. 2013. № 9. pp. 8—18. (In Russ)]
15. Lobanov I.Ye. Matematicheskoye modelirovaniye teploobmena i potoka v kruglykh trubakh s odnositel'no vysokimi vystupami polukruglogo poperechnogo secheniya pri techenii vozdukh pri bol'shikh chislakh Reynol'dsa // *Elektronnyy periodicheskiy retsenziruyemyy nauchnyy zhurnal "SCI-ARTICLE.RU"*. 2019. № 71 (iyul'). S. 63—76. [Lobanov I.E. Mathematical modeling of heat transfer and flow in round pipes with relatively high projections of semicircular cross-section during air flow at large Reynolds numbers // *Electronic periodic peer-reviewed scientific journal "SCI-ARTICLE.RU"*. 2019. № 71 (July). P. 63—76. (In Russ)]
16. Lobanov I.Ye. Matematicheskoye modelirovaniye teploobmena v trubakh s turbulatorami, a takzhe v sheroxovatykh trubakh, na vozdukh pri bol'shikh chislakh Reynol'dsa // *Otraslevyye aspekty tekhnicheskikh nauk*. 2013. № 9. S. 818. [Lobanov I.E. Mathematical modeling of

- heat transfer in pipes with turbulators, as well as in rough pipes, in the air at large Reynolds numbers // Branch aspects of technical sciences. 2013. № 9. pp. 8–18. (In Russ)]
17. Lobanov I.Ye. Teoreticheskoye matematicheskoye modelirovaniye techeniya i teploobmena v pryamykh kruglykh trubakh s turbulatorami polukruglogo poperechnogo secheniya, a takzhe v sherokhovatykh trubakh, na vozdukh pri bol'shikh chislakh Reynol'dsa // Veb-portal professional'nogo setevogo pedagogicheskogo soobshchestva "Ped-library.ru". 2019. [Lobanov I.E. Theoretical mathematical modeling of flow and heat transfer in a straight circular tubes with turbulators semi-circular cross section, as well as in rough tubes, in air at high Reynolds numbers // the Web portal of professional networking in the education community "Ped-library.ru". 2019. Access mode: <https://ped-library.ru/1548529792>. (In Russ)]
 18. Lobanov I.Ye. Matematicheskoye nizkoreynol'dsovoye modelirovaniye teploobmena v trubakh s turbulatorami na vozdukh pri bol'shikh chislakh Reynol'dsa // Innovatsionnyye podkhody v otraslyakh i sferakh. 2019. Tom № 4. Bypusk № 2 (fevral', 2019). Rezhim dostupa: <http://inf16.ru/vypusk-2-fevral-2019>. [Lobanov I.E. Mathematical low-Reynolds simulation of heat transfer in pipes with turbulators in the air at large Reynolds numbers // Innovative approaches in industries and spheres. 2019 .V. 4. Issue № 2 (February, 2019). Access mode: <http://inf16.ru/vypusk-2-fevral-2019>. (In Russ)]
 19. Lobanov I.Ye. Teoriya teploobmena v trubakh s turbulatorami pri $d/D=0,95\div 0,90$ i $t/D=0,25\div 1,00$, a takzhe v sherokhovatykh trubakh, na vozdukh pri bol'shikh chislakh Reynol'dsa $Re=1000000$ // Veb-portal professional'nogo setevogo pedagogicheskogo soobshchestva "Ped-library.ru". 2019. [Lobanov I.E. the Theory of heat transfer in tubes with turbulators at $d/D=0,95\div 0,90$ and $t/D=0,25\div 1,00$, as well as in rough tubes, in air at high Reynolds numbers $Re=1000000$ // Web portal network professional pedagogical community "Ped-library.ru". 2019. Access mode: <https://ped-library.ru/1561232054>. (In Russ)]
 20. Menyalkina Ye.N. Issledovaniye vliyaniya formy orebreniya na dinamiku potoka i soprotivleniye kanala // Al'manakh sovremennoy nauki i obrazovaniya. 2017. № 4–5 (118). S. 65–68. [Menyalkina E.N. A study of the influence of the shape of the fins on the dynamics of the stream and the channel resistance // Almanac of modern science and education. 2017. № 4–5 (118). pp. 65–68. (In Russ)]
 21. Manca O., Nardini S., Ricci D. Numerical Analysis of Water Forced Convection in Channels with Differently Shaped Transverse Ribs // Journal of Applied Mathematics. 2011. DOI: 10.1155/2011/323485.
 22. Tong-Miin Liou, Hwang J.J., Chen S.H. Simulation and measurement of enhanced turbulent heat transfer in a channel with periodic ribs on one principal wall // International Journal of Heat and Mass Transfer. 1993. № 36(2). pp. 507–517. DOI: 10.1016/0017-9310(93)80025-P.
 23. Ricci D., Manca O., Manca S., Nardini S. Two-Dimensional Numerical Investigation on Forced Convection in Channels With Transversal Ribs // Conference: ASME 2009 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, IMECE2009. 2009. DOI: 10.1115/IMECE2009-11203.
 24. Chaube A., Sahu P.K., Solanki S.C., Sharma P.B. Effect of Artificial Roughness on Convective Heat Transfer // 40th Thermophysics Conference. 2008. DOI: 10.2514/6.2008-3810.
 25. Ahn S.W., Son K.P. An investigation on friction factors and heat transfer coefficients in a rectangular duct with surface roughness // KSME International Journal. 2002. № 16(4). pp. 549–556.
 26. Kant K., Qayoum A. Numerical investigations of fluid flow and heat transfer in a ribbed duct is heated with variable aspect ratios // Recent Trends in Fluid Mechanics. 2016. V. 3. Issue 1. pp. 23–37.
 27. Kim J.-H., Heo Sung-Hoo J.-N., Jeeyoung S. Numerical analysis on heat transfer and pressure drop characteristics in a horizontal channel with various ribs // DOI: 10.5916/jkosme.2013.37.1.40.
 28. Smith E., Wayo C. Analysis of turbulent heat transfer and fluid flow in channels with various ribbed internal surfaces // Journal of Thermal Science. 2011. № 20(3). pp. 260–267. DOI: 10.1007/s11630-011-0468-3.
 29. Naveen S., Andallib T., Manish M. Experimental Investigation of Heat Transfer Enhancement in Rectangular Duct with Pentagonal Ribs // Heat Transfer Engineering. 2017. DOI: 10.1080/01457632.2017.1421135.
 30. Lobanov I.Ye. Matematicheskoye modelirovaniye teploobmena v trubakh s kvadratnymi turbulatorami pri $d/D=0,95\div 0,90$ i $t/D=0,25\div 1,00$ na vozdukh pri bol'shikh chislakh Reynol'dsa $Re=1000000$ // Veb-portal professional'nogo setevogo pedagogicheskogo soobshchestva "Ped-library.ru". 2019. [Lobanov I.E. Mathematical modeling of heat transfer in pipes with square turbulators at $d/D=0,95\div 0,90$ and $t/D=0,25\div 1,00$ in air at large Reynolds numbers $Re=1000000$ // Web-portal of the professional network pedagogical community "Ped-library.ru". 2019. Access mode: <https://ped-library.ru/1572707532>. (In Russ)]

Сведения об авторе:

Лобанов Игорь Евгеньевич, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник ПНИЛ-204 МА, e-mail: lloobbaannooff@live.ru

Information about the author:

Igor E. Lobanov, Dr. Sci. (Technical), Leading Researcher, PNIL-204 MA, e-mail: lloobbaannooff@live.ru

Конфликт интересов.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 29.12.2020.

Принята в печать 01.02.2021.

Conflict of interest.

The author declare no conflict of interest.

Received 29.12.2020.

Accepted for publication 01.02.2021.

Для цитирования: И.С. Медведков. Косвенные методы определения массы сжиженного природного газа в криогенных транспортных резервуарах. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2021; 48 (1): 51-64. DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-1-51-64

For citation: I.S. Medvedkov. Indirect methods for determining the mass of liquefied natural gas in cryogenic transportation tanks. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2021; 48 (1): 51-64. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-1-51-64

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ
POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL MECHANICAL ENGINEERING

УДК 661.91-404, 66-911.3, 66-911.4

DOI: 10.21822/2073-6185-2021-48-1-51-64

КОСВЕННЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МАССЫ СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА В КРИОГЕННЫХ ТРАНСПОРТНЫХ РЕЗЕРВУАРАХ

И.С. Медведков

ООО «Газпром ВНИИГАЗ»,

142717, Московская обл., Ленинский городской округ, сельское поселение Развилковское, поселок Развилка, Проектируемый проезд № 5537, владение 15, стр.1, Россия

Резюме. Цель. Задачи учета расхода, а также оценки потерь криогенного продукта на объектах производства и потребления сопряжены с определением массы парожидкостной среды в емкостном оборудовании. **Метод.** Расчет массы криогенной парожидкостной среды связан с определением плотности паровой и жидкой фаз. Плотности сред, в свою очередь, зависят от их компонентного состава, давления и температуры, которые, в общем случае, не могут быть определены достоверно без проведения прямых измерений. Однако для оценки массы в резервуарах, состояние среды в которых может быть принято как равновесное, задача может быть существенно упрощена и недостающие сведения восстановлены на основе косвенных методов. К подобному типу систем можно отнести криогенные бортовые топливные системы и, в частности, топливные криогенные баки, поскольку движение транспортного средства приводит к перемешиванию хранящегося продукта и может быть принято допущение о равновесности парожидкостной среды. Аналогичным образом методика может быть распространена на транспортные резервуары и мультимодальные емкости. **Результат.** Приведен обзор и сравнение применяемых методов расчета плотности и равновесных составов парожидкостной среды для углеводородных смесей типа СПГ в области криогенных температур. Существующие методики расчета плотности и состава фаз криогенных многокомпонентных сред сложны в практическом инженерном применении и не могут быть рекомендованы для оценки расхода сжиженного природного газа в производственных задачах учета расхода топлива и контроля его количества. Предложен удобный в использовании упрощенный расчетный аппарат для определения состояния парожидкостной среды в криогенных резервуарах, основанный на аппроксимационных зависимостях. **Вывод.** Упрощенная методика, приведенная в статье, носит аппроксимационный характер, однако основана на строгих физических зависимостях, а потому не приводит к существенному увеличению погрешности при варьировании исходных условий. В качестве исходных данных в методику передаются состав сжиженного природного газа, который может быть получен из паспорта продукции, и давление парожидкостной среды.

Ключевые слова: сжиженный природный газ (СПГ), определение плотности, определение массы, криогенный резервуар

INDIRECT METHODS FOR DETERMINING THE MASS OF LIQUEFIED NATURAL GAS IN CRYOGENIC TRANSPORTATION TANKS

I.S. Medvedkov

Gazprom VNIIGAZ LLC,

Projected passage No. 5537, possession 15, building, Moscow region 1142717,
Leninsky urban district, Razvilkovskoe rural settlement, Razvilka village, Russia

Abstract. Objective. Flow metering and the evaluation of cryogenic product losses at production and consumption facilities involve determining the mass of the vapor-liquid medium in the tank equipment. **Meth-**

ods. The calculation of the mass of the cryogenic vapor-liquid medium is associated with the determination of the density of the vapor and liquid phases. The densities of media, in turn, depend on their component composition, pressure, and temperature, which, in general, cannot be determined reliably without direct measurements. However, for the estimation of mass in tanks, the state of the medium in which is accepted as equilibrium, the problem can be significantly simplified, and the missing information recovered based on indirect methods. This type of system includes cryogenic onboard fuel systems and, in particular, cryogenic fuel tanks, since the movement of the vehicle leads to mixing of the stored product, and an assumption can be made about the equilibrium of the vapor-liquid medium. Similarly, the methodology can be extended to transport tanks and multimodal reservoirs. **Results.** A review and comparison of the applied methods for calculating the density of the vapor-liquid medium and equilibrium compositions for hydrocarbon liquefied natural gas type mixtures in the cryogenic temperature range are presented. The existing methods for calculating the density and phase composition of cryogenic multicomponent media are complex in practical engineering and cannot be recommended for estimating the consumption of liquefied natural gas in the production tasks of fuel flow metering and quantity control. An easy-to-use simplified calculation device for determining the state of a vapor-liquid medium in cryogenic tanks based on approximation dependencies is proposed. **Conclusion.** The simplified method is approximate in nature but is based on strict physical dependencies, and therefore does not lead to a significant increase in the error when varying the initial conditions. The liquefied natural gas composition, which can be obtained from the product data sheet, and the pressure of the vapor-liquid medium are transmitted to the methodology as initial data.

Keywords: liquefied natural gas (LNG), density determination, mass determination, cryogenic tank

Введение. Для точного определения компонентного состава по одной из доступных расчетных методик следует определить фазовое равновесие паровой и жидкостной фракции при известных значениях степени заполнения (объемного паросодержания), давления или температуры парожидкостной среды.

При проведении расчета принимается, что: парожидкостная смесь находится в равновесном состоянии; измеренное значение температуры или давления распространяется на весь внутренний объем резервуара; суммарный компонентный состав парожидкостной среды равен исходному паспортному составу СПГ.

Существенное влияние на точность расчета массы парожидкостной среды оказывает корректное определение плотности жидкости. При расчете плотности жидкости определяющим становится знание температуры жидкой фазы. Масса парожидкостной среды может быть определена по формуле (1)

$$M = (\rho_L \cdot \Psi + \rho_V \cdot (1 - \Psi)) \cdot V = \rho_{LV} \cdot V \quad (1)$$

где V – полная вместимость резервуара – номинальный внутренний объем внутреннего сосуда, м³;

ρ_{LV} – плотность парожидкостной среды, находящейся в резервуаре, кг/м³;

Ψ – степень заполнения резервуара, б.р.;

ρ_L и ρ_V – плотности жидкой и паровой фазы в резервуаре, кг/м³.

В общем случае ρ_L и ρ_V зависят от компонентного состава жидкой и парообразной фракций СПГ, а также от температуры и давления среды.

В рассматриваемых задачах температура среды, как правило, не измеряется. Поэтому определение плотности должно сопровождаться восстановлением значения температуры жидкости по известным значениям степени заполнения и давления среды.

Формализованный алгоритм расчета состояния парожидкостной системы описан на рис.1.

В качестве исходных данных на вход передаются: общий компонентный состав среды x , измеренное давление среды P_m , измеренная степень заполнения резервуара Ψ .

С целью организации итерационного процесса система уравнений дополняется выражением (2) для вычисления мольного паросодержания среды.

$$\varphi = \frac{\mu_L \cdot \rho_V \cdot (1 - \Psi)}{\mu_V \cdot \rho_L \cdot \Psi + \mu_L \cdot \rho_V \cdot (1 - \Psi)} \quad (2)$$

где φ – мольное паросодержание среды, б.р.;

μ_L и μ_V – мольные веса жидкой фазы и паровой фазы в резервуаре, кг/кмоль;

Ψ – степень заполнения резервуара, б.р.;

ρ_L и ρ_V – плотности жидкой и паровой фазы в резервуаре, кг/м³.

Постановка задачи. Для осуществления расчета по указанному алгоритму (рис. 1) необходим доступ к специальным расчетным программным комплексам, позволяющим с достаточной точностью и надежностью определять равновесные составы пара и жидкости для углеводородных смесей заданного состава по известным значениям давления и мольного паросодержания [1,2].

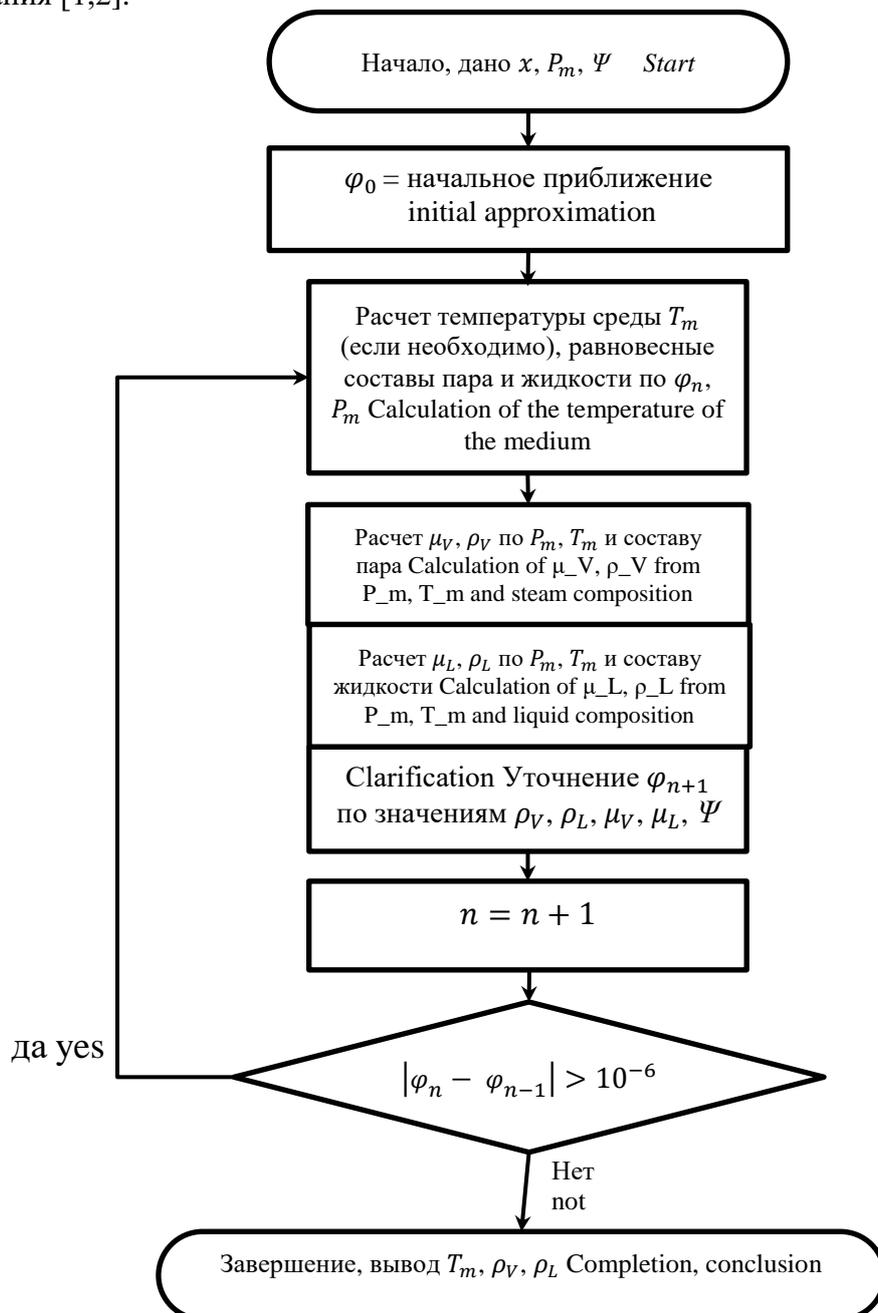


Рис.1. Блок-схема алгоритма расчета состояния парожидкостной среды по измеренным значениям давления и степени заполнения
Fig.1. Block diagram of the algorithm for calculating the state of a vapor-liquid medium based on the measured values of pressure and degree of filling

Методы исследования. Существующие зависимости для определения плотности и компонентного состава паровой и жидкой фаз.

При расчете состояния парожидкостных систем для углеводородных смесей используют набор хорошо зарекомендовавших себя методик, основанных на уравнениях состояния или на применении аппроксимационных зависимостей. Описание методик приведено в работах [1,3,4, 9-13].

В целом методики можно классифицировать, разбив на три группы:

1. Методики на основе общих уравнений состояния. К таким можно отнести уравнения Пенга-Робинсона (PR), Сова-Редлиха-Квонга (SRK), Редлиха-Квонга-Барсука (RKB), Nasrifar-Moshfeghian (NM и MNM) и GERG [5,6].
2. Методики на основе модифицированных уравнений состояния, в которых значения удельных объемов дополнительно корректируются в ходе расчетов, как, например, в уравнении Сова-Редлиха-Квонга со смещением объема (VTSRK).
3. Аппроксимационные зависимости, разработанные для непосредственного расчета плотности (удельных объемов) углеводородных семей. Например корреляции Йена-Вудса (YW), COSTALD, ГОСТ 31369 [7] и ГОСТ Р 56851 [8].

Уравнения состояния из первой группы могут быть применены для расчета равновесных составов пара и жидкости, температуры парожидкостной среды и плотности пара. Подробные описания алгоритмов расчета и решаемых систем уравнений приведены в соответствующей литературе [2].

Поскольку плотность пара, и, следовательно, точность его расчета несущественно влияют на погрешность расчета массы парожидкостной среды, указанный параметр может быть рассчитан с достаточной точностью любым из перечисленных уравнений состояния. В этом случае погрешность расчета плотности пара по известному давлению, температуре и компонентному составу не будет превышать 0,5 %.

Куда более существенное влияние на погрешность определения массы оказывает точность расчета жидкости. Так, например, в работе [3] подробно рассмотрены наиболее распространенные методы расчета плотности жидкости и оценена их точность. Сравнение методов осуществлялось на примере нескольких смесей углеводородов, для которых имелись экспериментальные данные по плотности в жидком фазовом состоянии. Составы смесей приведены в табл. 1.

Таблица 1. Компонентные составы смесей углеводородов, использованных для расчета плотности жидкости [3], %, мольн

Table 1. Component compositions of mixtures of hydrocarbons used to calculate the density of the liquid [3],%, mol

Компонент Component	Обозначение смеси Mix designation				
	A	B	C	D	E
Метан Methane	85.34	75.44	75.70	74.27	90.07
Этан Ethane	7.90	15.40	13.59	16.51	6.54
Пропан Propane	4.73	6.95	6.74	6.55	2.20
Изобутан Isobutane	0.85	0.98	1.34	0.84	0.29
Н-бутан N-butane	0.99	1.06	1.33	0.89	0.28
Изопентан Isopentane	0.10	0.09	0.22	0.07	0.01
Н-пентан N-pentane	0.09	0.08	0.22	0.07	0.01
Азот Nitrogen	0.00	0.00	0.86	0.80	0.60

В табл. 2 и 3 приведены результаты расчетов плотности жидких смесей углеводородов по различным методикам. Для табл. 2 и 3 составы смесей А – Е указаны в табл. 1. Сравнительные таблицы подготовлены на основе данных статьи, путем дополнения результатами расчетов по методикам PR+YW, RKB, ГОСТ Р и GERG. В результате анализа полученных погрешно-

стей, наиболее точными методами расчета плотности для представленных смесей и диапазонов температур являются ГОСТ Р (средняя относительная погрешность $\delta_{\rho_L} = 0,24 \%$) и GERG ($\delta_{\rho_L} = 0,20 \%$).

Таблица 2. Сравнение методик расчета плотности сжиженного природного газа
Table 2. Comparison of methods for calculating the density of liquefied natural gas

Смесь Mixture	T, К	P, МПа	ρ_L , кг/м ³	Относительная погрешность расчета плотности δ_{ρ_L} , % Relative error of density calculation				
				PR	PR+YW	COSTALD	RKB	SRK
A	110	0,0787	484,09	10,89	-0,15	0,39	3,72	-1,53
A	115	0,1172	477,32	10,94	-0,16	0,38	3,50	-1,55
A	120	0,1686	470,57	10,91	-0,24	0,34	3,23	-1,64
A	125	0,2351	463,69	10,85	-0,34	0,31	3,04	-1,76
A	130	0,321	456,64	10,74	-0,51	0,26	2,45	-1,91
B	110	0,0723	511,88	10,10	-0,64	0,45	1,52	-2,14
B	115	0,1081	505,74	10,14	-0,75	0,38	1,04	-2,17
B	120	0,1549	499,23	10,20	-0,83	0,35	1,00	-2,17
B	125	0,2153	492,51	10,25	-0,94	0,34	0,99	-2,19
C	110	0,1155	515,28	9,98	-0,13	0,48	0,75	-2,24
C	115	0,1595	508,72	10,09	-0,22	0,47	0,75	-2,20
C	120	0,2155	502,28	10,13	-0,43	0,42	0,71	-2,23
C	125	0,2873	495,75	10,13	-0,84	0,36	0,67	-2,29
C	130	0,3744	489,08	10,10	-1,48	0,30	0,63	-2,38
D	110	0,1158	512,97	10,22	-1,03	0,46	0,69	-2,04
D	115	0,1584	506,68	10,27	-1,15	0,40	0,64	-2,05
D	120	0,2093	499,88	10,38	-1,27	0,42	0,67	-2,02
D	125	0,2853	493,27	10,40	-1,62	0,38	0,65	-2,06
E	115	0,1456	454,01	11,64	-0,69	0,20	0,32	-1,02
E	120	0,2024	446,95	11,52	-0,77	0,15	0,35	-1,19
E	125	0,2762	439,42	11,43	-0,93	0,17	0,41	-1,33
E	130	0,3698	431,97	11,22	-1,29	0,16	0,39	-1,59
Среднее				10,57	0,75	0,34	1,28	1,90

Упрощенные методики определения плотности паровой и жидкой фаз

Применение приведенных в разделе 2 корреляций осложняется необходимостью расчета состава жидкости и пара, а также восстановления равновесного значения температуры среды. Однако ряд условий, характерных для задач обращения СПГ, позволяет использовать относительно простые корреляции для оценки температуры среды и плотности углеводородных смесей.

В данном разделе приведены рекомендуемые способы упрощенного расчета указанных параметров. Если измеряемой величиной является температура среды, то для приближенного определения плотности жидкости рекомендуется использовать методику, приведенную в ГОСТ Р 56851 [15].

Компонентный состав жидкости, при этом, задается равным суммарному компонентному составу парожидкостной среды. Состав парожидкостной среды определяется из паспорта на партию СПГ, заправленного в резервуар. В этом случае измеренная температура дополняет исходные данные при определении плотности жидкости, а погрешности расчета по ГОСТ Р при степени заполнения резервуара более 30 % не превысит 1 %.

Таблица 3. Сравнение методик расчета плотности сжиженного природного газа
Table 3. Comparison of methods for calculating the density of liquefied natural gas

Смесь Mixture	T, К	P, МПа	ρ_L , кг/м ³	Относительная погрешность расчета плотности δ_{ρ_L} , % Relative error of density calculation				
				VTSRK	NM	MNM	ГОСТ Р	GERG
A	110	0,0787	484,09	1,64	-0,68	-2,03	-0,26	-0,23
A	115	0,1172	477,32	1,57	-0,29	-1,55	-0,25	-0,21
A	120	0,1686	470,57	1,43	0,10	-1,11	-0,26	-0,23
A	125	0,2351	463,69	1,26	0,47	-0,69	-0,28	-0,24
A	130	0,321	456,64	1,05	0,81	-0,29	-0,29	-0,26
B	110	0,0723	511,88	1,58	-1,25	-2,25	-0,16	-0,10
B	115	0,1081	505,74	1,50	-0,95	-1,86	-0,23	-0,15
B	120	0,1549	499,23	1,44	-0,57	-1,43	-0,24	-0,16
B	125	0,2153	492,51	1,38	-0,16	-0,99	-0,22	-0,14
C	110	0,1155	515,28	1,51	-1,17	-2,15	-0,36	-0,33
C	115	0,1595	508,72	1,50	-0,79	-1,70	-0,36	-0,31
C	120	0,2155	502,28	1,42	-0,42	-1,29	-0,39	-0,34
C	125	0,2873	495,75	1,30	-0,05	-0,90	-0,43	-0,37
C	130	0,3744	489,08	1,16	0,28	-0,52	-0,46	-0,39
D	110	0,1158	512,97	1,64	-1,22	-2,20	-0,10	-0,07
D	115	0,1584	506,68	1,58	-0,90	-1,80	-0,15	-0,11
D	120	0,2093	499,88	1,57	-0,47	-1,32	-0,11	-0,07
D	125	0,2853	493,27	1,47	-0,10	-0,91	-0,13	-0,08
E	115	0,1456	454,01	1,57	-0,03	-1,54	-0,15	-0,15
E	120	0,2024	446,95	1,35	0,34	-1,10	-0,17	-0,17
E	125	0,2762	439,42	1,15	0,75	-0,62	-0,13	-0,12
E	130	0,3698	431,97	0,84	1,06	-0,23	-0,15	-0,14
Среднее				1,41	0,58	1,29	0,24	0,20

При меньших степенях заполнения погрешность возрастает до 4 %. Если измеряемой характеристикой является только давление парожидкостной среды, необходимую температуру среды предлагается рассчитывать по аппроксимации (1).

$$T_m = T_{C_1} \cdot x_{C_1} + 0,634 \cdot T_{C_{2+}} + x_{N_2} \cdot (6,312 \cdot T_{N_2} - 129,9 \cdot \Psi - 561,5) \quad (1)$$

$$x_{C_1} = 1 - x_{C_{2+}} - x_{N_2} \quad (2)$$

$$x_{C_{2+}} = x_{C_2} + x_{C_3} + x_{iC_4} + x_{nC_4} \quad (3)$$

$$T_{C_{2+}} = T_{C_2} \cdot x_{C_2} + T_{C_3} \cdot x_{C_3} + T_{iC_4} \cdot x_{iC_4} + T_{nC_4} \cdot x_{nC_4} \quad (4)$$

где T_m – температура парожидкостной среды, К;

x_{C_1} – нормализованная мольная доля метана, определяется по формуле (2), б.р.;

x_{C_2} , x_{C_3} , x_{iC_4} , x_{nC_4} и x_{N_2} – мольные доли этана, пропана, изобутана, н-бутана и азота для парожидкостной среды, б.р.;

$x_{C_{2+}}$ – суммарная мольная доля высококипящих углеводородов от этана до н-бутана, определяется по формуле (3), б.р.;

$T_{C_{2+}}$ – температурный фактор высококипящих углеводородов, определяемый по формуле (4), К;

T_{C_1} , T_{C_2} , T_{C_3} , T_{iC_4} , T_{nC_4} и T_{N_2} – температуры насыщения метана, этана, пропана, изобутана, н-бутана и азота при измеренном давлении, К;

Ψ – степень заполнения резервуара, б.р.

Температуры насыщения чистых компонентов от давления системы предлагается определять по выражению (5):

$$T = A_1 + B_1 \cdot \ln(P_m) + C_1 \cdot \ln(P_m)^2 + D_1 \cdot \ln(P_m)^3 \quad (5)$$

где P_m – измеренное давление системы, МПа;

T – температура насыщения компонента, К;

A_1, B_1, C_1 и D_1 – индивидуальные коэффициенты для чистых компонентов, рекомендуемые значения которых приведены в табл. 4.

Таблица 4. Значения коэффициентов в уравнении (5)
Table 4. Values of coefficients in equation (7)

	Метан Methane	Этан Ethane	Пропан Propane	Изобутан Isobutane	Н-бутан N-butane	Азот Nitrogen
A_1	149,14	241,11	300,13	339,31	352,51	103,75
B_1	21,84	32,63	39,78	44,89	45,90	15,47
C_1	2,980	4,299	5,201	5,857	5,925	2,144
D_1	0,2588	0,3661	0,4388	0,4874	0,4897	0,1854

Аппроксимацию (1) допустимо применять, если суммарная мольная доля высококипящих углеводородов $x_{C_{2+}}$ находится в диапазоне от 0 до 7,5%, мольная доля азота x_{N_2} – в диапазоне от 0 до 4,25%, давление в резервуаре – в диапазоне от 0,1 до 1,3 МПа, степень заполнения Ψ – в диапазоне от 10% до 90%. Условия применимости формул (1) – (4) приведены в табл.5.

Таблица 5. Условия применимости выражений (1) – (4), (7)
Table 5. Conditions of applicability of expressions (3) - (6), (9)

Давление, Pressure МПа	Температура, Temperature, К	Содержание углеводородов C_{2+} , мольн. % The content of hydrocarbons $C_2 +$, mol.	Содержания азота, мольн. % Nitrogen content, mol. %	Безразмерная степень заполнения, Dimensionless degree of filling, %
0,1...1,3	100...157	0...7,5	0...4,25	10...90

Погрешность расчета плотности жидкости по методике ГОСТ Р 56851 с учетом давления среды и аппроксимации температуры по формуле (1) не превысит 3% (компонентный состав жидкости, при этом, задается равным суммарному компонентному составу парожидкостной среды). Расчет плотности жидкости может быть упрощен, если соблюдаются условия применимости аппроксимации (1) (табл.5).

В этом случае, плотность жидкости определяется по выражению (6).

$$\rho_L = \frac{\mu_L}{v_L} \quad (6)$$

$$v_L = v_{C_1} \cdot x_{C_1}^{0,21} + v_{C_{2+}} \cdot (1,908 - 42,06 \cdot v_{C_1} \cdot x_{C_1}) + 0,0413 \cdot v_{N_2} \cdot \sqrt{x_{N_2}} \quad (7)$$

$$v_{C_{2+}} = v_{C_2} \cdot x_{C_2} + v_{C_3} \cdot x_{C_3} + v_{iC_4} \cdot x_{iC_4} + v_{nC_4} \cdot x_{nC_4} \quad (8)$$

$$\mu_L = \mu_{C_1} \cdot x_{C_1} + \mu_{C_2} \cdot x_{C_2} + \mu_{C_3} \cdot x_{C_3} + \mu_{iC_4} \cdot x_{iC_4} + \mu_{nC_4} \cdot x_{nC_4} + \mu_{N_2} \cdot x_{N_2} \quad (9)$$

где ρ_L – плотность жидкости, кг/м³;

v_L – мольный удельный объем жидкости, который определяется по формуле (7), м³/кмоль;

$v_{C_1}, v_{C_2}, v_{C_3}, v_{iC_4}, v_{nC_4}$ и v_{N_2} – мольные удельные объемы метана, этана, пропана, изобутана, н-бутана и азота в жидком фазовом состоянии при заданной температуре смеси. Мольный

удельный объем – функция от температуры – определяется при температуре среды T_m , м³/кмоль;

x_{C_1} – нормализованная мольная доля метана, определяется по формуле (2), б.р.;

x_{C_2} , x_{C_3} , x_{iC_4} , x_{nC_4} и x_{N_2} – мольные доли этана, пропана, изобутана, н-бутана и азота для парожидкостной среды, б.р.;

$v_{C_{2+}}$ – объемный фактор высококипящих углеводородов, определяемый по формуле (8), м³/кмоль;

μ_L – мольный вес смеси, который определяется по формуле (9), кг/кмоль;

μ_{C_1} , μ_{C_2} , μ_{C_3} , μ_{iC_4} , μ_{nC_4} и μ_{N_2} – мольный вес метана, этана, пропана, изобутана, н-бутана и азота, кг/кмоль.

Для определения v_{C_1} , v_{C_2} , v_{C_3} , v_{iC_4} , v_{nC_4} и v_{N_2} могут использоваться доступные справочные таблицы или формулы, устанавливающие зависимость удельного объема или плотности чистых компонентов в жидком фазовом состоянии от температуры. При определении удельных объемов следует учитывать соотношение (10).

$$v(T_m) = \frac{\mu}{\rho(T_m)} \quad (10)$$

где ρ – плотность чистого компонента, кг/м³;

v – мольный удельный объем чистого компонента, м³/кмоль;

μ – мольный вес чистого компонента, кг/кмоль;

T_m – температура парожидкостной среды – определяется по формуле (1) или является измеряемой величиной, К.

При определении мольного веса чистых компонентов рекомендуется использовать ГОСТ Р 56851, Таблица А.1. [15]

В качестве альтернативы в диапазоне температур от 100 К до 165 К для определения v_{C_1} , v_{C_2} , v_{C_3} , v_{iC_4} , v_{nC_4} и v_{N_2} – удельного мольного объема чистых компонентов в жидком фазовом состоянии – предлагается использовать аппроксимационную зависимость (11).

$$v = A_2 + B_2 \cdot T_r + C_2 \cdot T_r^2 + D_2 \cdot T_r^3 \quad (11)$$

$$T_r = \frac{T_m}{100} \quad (12)$$

где v – удельный мольный объем чистого компонента в жидком состоянии, м³/кмоль;

T_m – температура парожидкостной среды, К;

T_r – редуцированная температура парожидкостной среды, определяемая по выражению (12), б.р.;

A_2 , B_2 , C_2 и D_2 – индивидуальные коэффициенты для чистых компонентов, рекомендуемые значения которых приведены в табл. 6.

Для азота в диапазоне температур от 120 К до 126,25 К действует зависимость (13):

$$v_{N_2} = T_r \cdot \{\theta \cdot [4,777 + 3,787 \cdot (\theta \cdot 2,56 \cdot 10^{-5} - T_r)] + 148,3\} \cdot 10^{-3} - 0,1247 \quad (13)$$

$$\theta = \exp(T_m - 120) \quad (14)$$

где v_{N_2} – удельный мольный объем чистого азота в жидком состоянии, м³/кмоль;

T_m – температура жидкости, К.

При температуре 126,25 К и выше для азота принимается, что удельный мольный объем равен постоянной величине $v_{N_2} = 0,092$ м³/кмоль.

Таблица 6. Значения коэффициентов в уравнении (11)
Table 6. Values of coefficients in equation (13)

	Метан Methane	Этан Ethane	Пропан Propane	Изобутан Isobutane	Н-бутан N-butane	Азот Nitro- gen (до 120 К)
A_2	0,008711	0,04181	0,05263	0,06755	0,06672	-0,8972
B_2	0,05895	0,002698	0,008948	0,009929	0,009271	2,672
C_2	-0,04720	0,002400	0	0	0	-2,573
D_2	0,01595	0	0	0	0	0,8385

Погрешность расчета плотности жидкой фазы по формулам (1) – (13) варьируется в зависимости от исходного состава смеси, давления и степени заполнения резервуара и определяется по табл.7.

Таблица 7. Погрешность расчета плотности жидкой фазы в резервуаре для углеводородных смесей типа СПГ по аппроксимациям (1) – (13)

Table 7. The error in calculating the density of the liquid phase in the reservoir for hydrocarbon mixtures of the LNG type according to approximations (3) - (15)

Давление, Pressure МПа	Содержание углеводородов C_{2+} , мольн. % The content of hydrocarbons C_{2+} , mol. %	Безразмерная степень заполнения, % Dimensionless degree of filling, %	Максимальная погрешность, % Maximum error, %
0,1...0,8	0...4	20...90	2
>0,8...1,4	>4	<20	3,3

Для расчета плотности парогазовой фазы рекомендуется применять метод Керла-Питцера, приведенный в ГОСТ 31369–2008, Приложение Е [14]. Для упрощения алгоритмизации метод может быть изложен в виде системы уравнений (15) – (20).

$$\rho_V = 120,272 \cdot \frac{\mu_V}{Z_m} \cdot \frac{P_m}{T_m} \quad (15)$$

$$\mu_V = \sum_i y_i \cdot \mu_i \quad (16)$$

$$Z_m = 1 - \left(\sum_i y_i \cdot \sqrt{1 - Z_i} \right)^2 \quad (17)$$

$$Z_i = 0,5 + \sqrt{0,25 + \frac{P_m}{P_{ci}} \cdot T_{rci} \cdot \Gamma_i} \quad (18)$$

$$\Gamma_i = (0,1445 + 0,073 \cdot \omega_{ci}) - T_{rci} \cdot (0,33 - 0,46 \cdot \omega_{ci}) - T_{rci}^2 \cdot (0,1385 + 0,5 \cdot \omega_{ci}) - T_{rci}^3 \cdot (0,0121 + 0,097 \cdot \omega_{ci}) - 0,0073 \cdot T_{rci}^8 \cdot \omega_{ci} \quad (19)$$

$$T_{rci} = \frac{T_{ci}}{T_m} \quad (20)$$

где ρ_V – плотность парогазовой среды, кг/м³;
 μ_V – мольный вес парогазовой среды, кг/кмоль;
 T_m – температура парожидкостной среды – определяется по формуле (1) или является измеряемым параметром, К;

P_m – давление парожидкостной среды, МПа;

Z_m – фактор сжимаемости парогазовой среды, б.р.;

μ_i – мольный вес i -го компонента в парогазовой среде, кг/кмоль;

y_i – мольная доля i -го компонента в парогазовой среде, б.р.;

Z_i – фактор сжимаемости i -го компонента в парогазовой среде, б.р.;

Γ_i – фактор Керла-Питцера, б.р.;

P_{ci} – критическое давление i -го компонента смеси, МПа;

T_{rci} – температурный фактор i -го компонента смеси определяется по формуле (20), б.р.;

T_{ci} – критическая температура i -го компонента смеси, К;

ω_{ci} – фактор ацентричности i -го компонента смеси, б.р.

Для определения плотности пара необходимо знать состав парогазовой фракции в резервуаре. Допущение о равенстве состава пара и состава парожидкостной среды в данном случае не применимо, в отличие от жидкой фазы.

Приблизительный состав парогазовой фракции в этом случае предлагается определять по выражениям (21) – (23).

$$y_i = \frac{x_i K_i}{1 + \varphi(K_i - 1)} \quad (21)$$

$$K_i = \exp \left\{ \ln \left(\frac{P_{ci}}{P_m} \right) + 5,373 \cdot (1 + \omega_{ci}) \cdot (1 - T_{rci}) \right\} \quad (22)$$

$$K_{N_2} = 8,06 - 2,67 \cdot P_m^{1,62} + 0,01 \cdot \bar{K}_{N_2}^{2,4} + 0,26 \cdot \left(\frac{\bar{K}_{N_2}}{P_m} \right)^{0,72} \quad (23)$$

$$\varphi = \frac{\rho_V \cdot (1 - \Psi)}{\rho_V + \Psi \cdot (\rho_L - \rho_V)} \quad (24)$$

где y_i – мольная доля i -го компонента в парогазовой среде, б.р.;

x_i – мольная доля i -го компонента в парожидкостной среде, б.р.;

K_i – коэффициент активности i -го компонента, б.р.;

K_{N_2} – коэффициент активности азота – уточняется с помощью дополнительной аппроксимации (23), б.р.;

\bar{K}_{N_2} – коэффициент активности азота, определенный по выражению (22), б.р.;

φ – мольное паросодержание парожидкостной среды, рассчитанное по приближенному выражению (24) (применение формулы (2) несущественно повышает точность расчета), б.р.;

ρ_L – плотность жидкой фазы, кг/м³;

Ψ – степень заполнения резервуара, б.р.;

Описание параметров ρ_V , T_{rci} , ω_{ci} , P_{ci} , P_m приведено в комментарии к выражениям (15) – (20).

В случае если выражение под корнем в формуле (18) для этана меньше нуля или рассчитанная мольная доля этана в парогазовой среде составляет менее 0,5%, можно исключить углеводороды от этана и выше при определении плотности парогазовой среды без значимого влияния на конечную точность расчета.

Определение плотности парогазовой среды ρ_V и состава парогазовой фракции y_i взаимосвязанный процесс и может решаться совместно итерационным методом. Как правило, для завершения итерационного процесса потребуется не более 2-х шагов алгоритма.

Сущность метода заключается в определении состава смеси по выражениям (21) – (23), а затем уточнении плотности по выражениям (15)–(20).

В качестве начального приближения плотности ρ_V на первом шаге предлагается использовать плотность насыщенного паробразного метана ρ''_{C_1} , полученную при давлении парожидкостной среды. Для вычисления ρ''_{C_1} допустимо использовать выражение (25).

$$\rho''_{C_1} = 14,2 \cdot P_m^{0,9} + 1,57 \cdot P_m^2 \quad (25)$$

где ρ''_{C_1} – плотность насыщенного паробразного метана, кг/м³;

P_m – давление парожидкостной среды, МПа.

Аппроксимация (25) обеспечивает допустимую погрешность при значениях давления от 0,03 МПа до 1,9 МПа. В случае если содержание азота в исходной смеси не превышает 1 %, при оценке плотности парогазовой среды допустимо ограничиваться расчетом по выражению (25).

Анализ результатов расчета по формулам (1)–(25) показывает, что применение корректирующих аппроксимаций позволяет снизить погрешность расчета плотности парожидкостной среды более чем на порядок по сравнению с оценкой, осуществленной по выражениям для чистого метана.

На рис. 2 – 4 приведены значения относительной погрешности расчета плотности парожидкостной среды по предложенным формулам (1) – (25) в зависимости от исходных параметров.

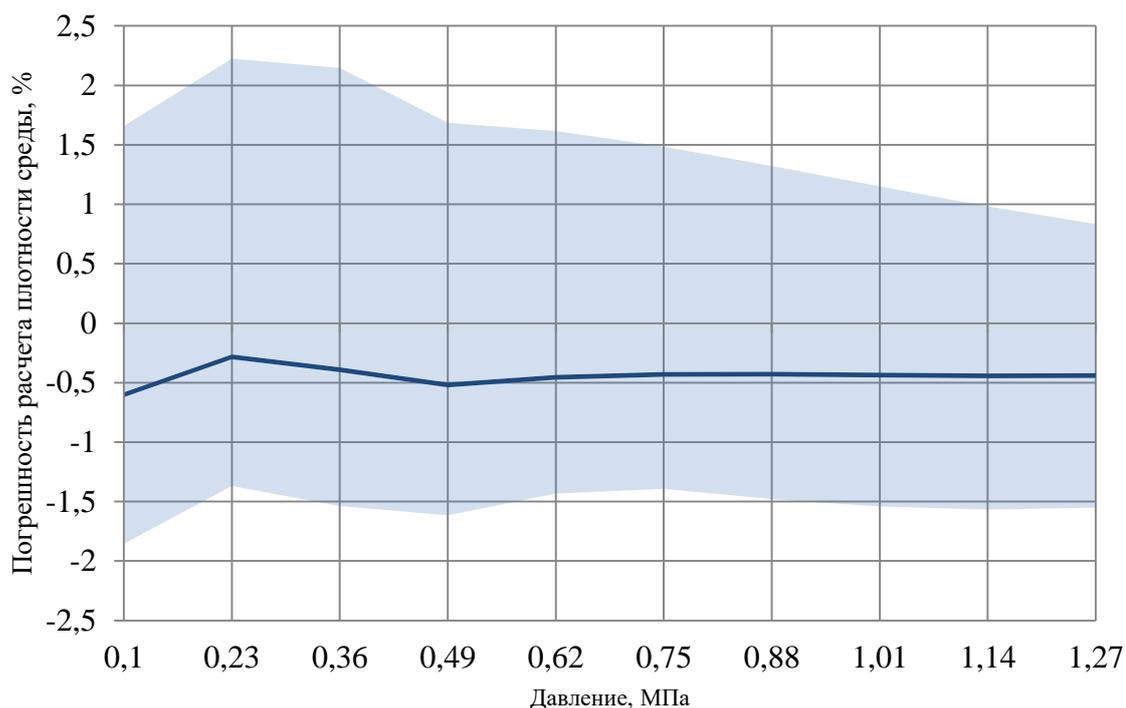


Рис. 2. Относительная погрешность расчета плотности парожидкостной среды по выражениям (1) – (25) в зависимости от давления в резервуаре

Линия на графике – зависимость средней относительной погрешности от давления.

Область на графике – разброс относительной погрешности, возникающий при варьировании степени заполнения, содержания азота и тяжелых углеводородов

Fig. 2. Relative error in calculating the density of a vapor-liquid medium according to expressions (2) - (26), depending on the pressure in the tank.

The line on the graph is the dependence of the average relative error on pressure.

The area on the graph is the scatter of the relative error that occurs when varying the degree of filling, nitrogen content and heavy hydrocarbon

Графики на рис. 2 – 4 построены по средним значениям погрешности, полученным путем фиксирования значения одного исходного параметра и варьирования других (давление, степень заполнения, содержание азота и суммарное содержание тяжелых углеводородов) в области допустимых значений (см. табл.5).

Разброс погрешности на рис. 2 – 4 изображен в виде области вокруг графиков средних значений погрешности.

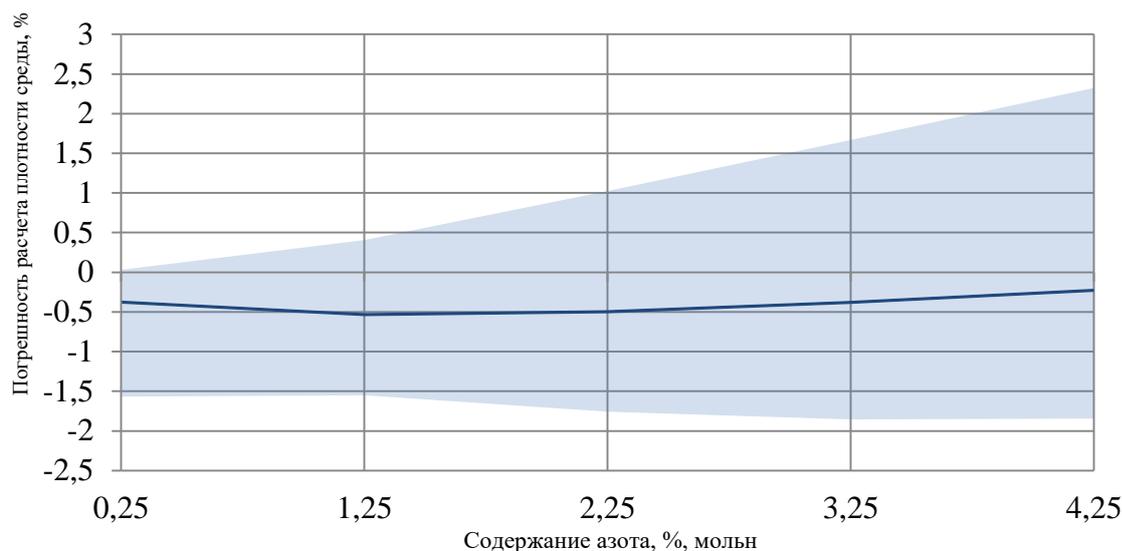


Рис. 3. Относительная погрешность расчета плотности парожидкостной среды по выражениям (1) – (25) в зависимости от содержания азота

*Линия на графике – зависимость средней относительной погрешности от содержания азота
 Область на графике – разброс относительной погрешности, возникающий при варьировании степени заполнения, давления и содержания тяжелых углеводородов*

Fig. 3. Relative error in calculating the density of a vapor-liquid medium according to expressions (2) - (26), depending on the nitrogen content

*The line on the graph is the dependence of the average relative error on the nitrogen content
 The area on the graph is the scatter of the relative error that occurs when varying the degree of filling, pressure and content of heavy hydrocarbons*

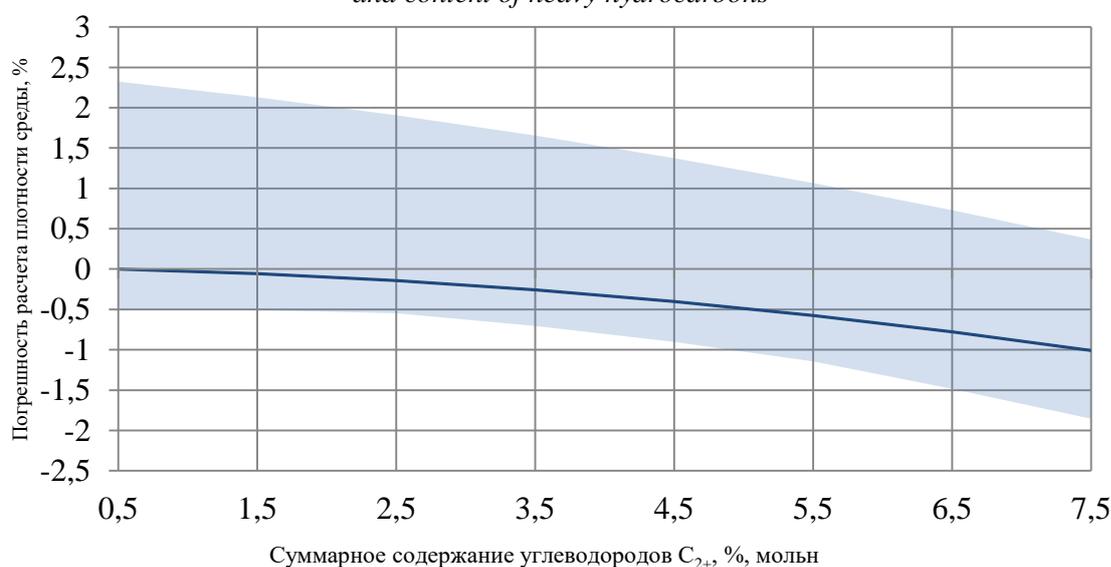


Рис. 4. Относительная погрешность расчета плотности парожидкостной среды по выражениям (1) – (25) в зависимости от суммарного содержания углеводородов C₂₊.

*Линия на графике – зависимость средней относительной погрешности от суммарного содержания тяжелых углеводородов
 Область на графике – разброс относительной погрешности, возникающий при варьировании степени заполнения, давления и содержания азота*

Fig. 4. Relative error in calculating the density of a vapor-liquid medium according to expressions (2) - (26) depending on the total content of hydrocarbons C₂₊ +

The line on the graph is the dependence of the average relative error on the total content of heavy hydrocarbons. The area on the graph is the scatter of the relative error that occurs when varying the degree of filling, pressure and nitrogen content

Вывод. При перевозке криогенных продуктов в емкостном неизотермическом оборудовании может быть принято допущение равновесного сосуществования паровой и жидкой фаз. При перевозке многокомпонентных продуктов, таких как СПГ, указанное условие позволяет использовать надежные методы расчета составов и плотностей паровой и жидкой фаз, что необходимо для оценки массы хранимого криогенного продукта.

Однако применение надежных и точных методов расчета весьма трудоемко и требует привлечения специального расчетного аппарата. На практике при перевозке СПГ, игнорируют компонентный состав СПГ и для оценки плотности используют свойства чистого метана, что приводит к появлению расчетной погрешности порядка 10 %. Даже в случае привлечения к оценке точных расчетных методик, таких как ГОСТ Р, отсутствие сведений о температуре и составе жидкой фазы приводит к увеличению погрешности расчета ее плотности.

В статье предложены приближенные и упрощенные методы оценки температуры и плотности парожидкостной среды, учитывающие изменение компонентного состава пара и жидкости при различных степенях заполнения, а также влияние содержания тяжелых углеводородов и азота в составе СПГ.

Применение предложенных аппроксимационных зависимостей позволяет существенно снизить погрешность оценки плотности парожидкостной среды, а, следовательно, и погрешность оценки массы продукта в резервуаре. Погрешность оценки плотности парожидкостной среды в случае расчета по формулам (1) – (25) не превысит 3 % при соблюдении условий их применимости.

Библиографический список:

1. Poling В.Е., Prausnitz J.M. The Properties of Gases and Liquids. 5th Edition. McGraw-Hill: New York. 2001. 768 pp.
2. Баталин О.Ю., Брусиловский А.И. Фазовые равновесия в системах природных углеводородов. – М.: «Недра», 1992. 272 с.
3. Comparing different methods for prediction of liquefied natural gas densities / J. Javanmardi, Kh. Nasrifar, M. Moshfeghian // Engineering Journal of the University of Qatar, Vol. 18, 2005, p. 39-56.
4. Горбачев С.П., Медведков И.С. Изменение компонентного состава СПГ при его длительной транспортировке и хранении, методы кондиционирования // Газовая промышленность 2018. №10(775). С.56-66.
5. Peng D.Y. and Robinson D.B. A new two constants equation of state. Ind. Eng. Chem. Fundam, 1976, 15, p. 59-64.
6. Барсуку С.Д. Расчет термодинамических свойств природного газа. Известия Академии наук СССР, 1981, №6, с.124-132.
7. Application of an Improved Equation of State to Reservoir Fluids: Computation of Minimum Miscibility Pressure / Kh.Nasrifar, M. Moshfeghian // J. Pet. Sci. Eng., 42, 2004, pp. 223-234.
8. Kunz O., Klimeck R., Wagner W., Jaeschke M. The GERG-2004 wide-range equation of state for natural gases and other mixtures. – Groupe Européen de Recherches Gazières technical monograph 15, 2007. – 535 pp [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.gerg.eu/wp-content/uploads/2019/10/TM15.pdf> (дата обращения: 29.01.2021).
9. ISO 20765-2:2015. Natural gas — Calculation of thermodynamic properties. Part 2: Single-phase properties (gas, liquid, and dense fluid) for extended ranges of application.
10. A Consistent Correlation for Redlich-Kwong-Soave Volumes / A. E. Peneloux, E. Rauzy, R. Freze // Fluid Phase Equilib., 8, 1982, pp. 7-23.
11. A generalized equation for computer calculation of liquid densities / L. C. Yen, S. S. Woods // AIChE J., 12, 1966, pp. 95-96.
12. A New Correlation for Saturated Densities of Liquids and Their Mixtures / R. W. Hankinson, G. H. Thomson // AIChE J., 25, no. 4, 1979, p. 653-663.
13. ISO 6578:2017. Refrigerated hydrocarbon liquids; static measurement; calculation procedure.
14. ГОСТ 31369–2008. Газ природный. Вычисление теплоты сгорания, плотности, относительной плотности и числа Воббе на основе компонентного состава [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/gost-31369-2008> (дата обращения: 29.01.2021).
15. ГОСТ Р 56851–2016. Газ природный сжиженный. Метод расчета термодинамических свойств [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200130097> (дата обращения: 29.01.2021).

References:

1. Poling B.E., Prausnitz J.M. The Properties of Gases and Liquids. 5th Edition. - McGraw-Hill: New York. 2001. 768 pp.
2. Batalin O.YU., Brusilovskiy A.I. Fazovyie ravnovesiya v sistemakh prirodnykh uglevodorodov. – M.: «Nedra», 1992. – 272 s. [Batalin O.Yu., Brusilovsky A.I. Phase equilibria in natural hydrocarbon systems. M.: "Nedra", 1992. 272 p. (In Russ)]
3. Comparing different methods for prediction of liquefied natural gas densities / J. Javanmardi, Kh. Nasrifar, M. Moshfeghian // Engineering Journal of the University of Qatar, Vol. 18, 2005, p. 39-56.
4. Gorbachev S.P., Medvedkov I.S. Izmeneniye komponentnogo sostava SPG pri yego dlitel'noy transportirovke i khraneni, metody konditsionirovaniya // Gazovaya promyshlennost' – 2018. –№10(775) – S.56-66. [Gorbachev S.P., Medvedkov I.S. Changes in the composition of LNG during its long-term transportation and storage, conditioning methods // Gas Industry. 2018. №10 (775). С.56-66. (In Russ)]
5. Peng D.Y. and Robinson D.B. A new two constants equation of state. Ind. Eng. Chem. Fundam, 1976, 15, pp. 59-64.
6. Barsuk S.D. Raschet termodinamicheskikh svoystv prirodnogo gaza. Izvestiya Akademii nauk SSSR, 1981, №6, s.124-132. [Barsuk S.D. Calculation of the thermodynamic properties of natural gas. Bulletin of the Academy of Sciences of the USSR, 1981, No. 6, pp. 124-132. (In Russ)]
7. Application of an Improved Equation of State to Reservoir Fluids: Computation of Minimum Miscibility Pressure / Kh.Nasrifar, M. Moshfeghian // J. Pet. Sci. Eng., 42, 2004, pp. 223-234.
8. Kunz O., Klimeck R., Wagner W., Jaeschke M. The GERG-2004 wide-range equation of state for natural gases and other mixtures. - Groupe Européen de Recherches Gazières technical monograph 15, 2007. 535 pp [Electronic resource]. Access mode: <https://www.gerg.eu/wp-content/uploads/2019/10/TM15.pdf> (date accessed: 01/29/2021).
9. ISO 20765-2: 2015. Natural gas - Calculation of thermodynamic properties. Part 2: Single-phase properties (gas, liquid, and dense fluid) for extended ranges of application.
10. A Consistent Correlation for Redlich-Kwong-Soave Volumes / A. E. Peneloux, E. Rauzy, R. Freze // Fluid Phase Equilib., 8, 1982, pp. 7-23.
11. A generalized equation for computer calculation of liquid densities / L. C. Yen, S. S. Woods // AIChE J., 12, 1966, pp. 95-96.
12. A New Correlation for Saturated Densities of Liquids and Their Mixtures / R. W. Hankinson, G. H. Thomson // AIChE J., 25, No. 4, 1979, p. 653-663.
13. ISO 6578: 2017. Refrigerated hydrocarbon liquids; static measurement; calculation procedure.
14. GOST 31369–2008. Gaz prirodnyy. Vychisleniye teploty sgoraniya, plotnosti, odnositel'noy plotnosti i chisla Wobbe na osnove komponentnogo sostava [Elektronnyy resurs]. Rezhim dostupa: <http://docs.cntd.ru/document/gost-31369-2008> (data obrashcheniya: 29.01.2021). [GOST 31369-2008. Natural gas. Calculation of combustion heat, density, relative density and Wobbe number based on component composition [Electronic resource]. Access mode: <http://docs.cntd.ru/document/gost-31369-2008> (date of access: 01/29/2021). (In Russ)]
15. GOST R 56851–2016. Gaz prirodnyy szhizhennyy. Metod rascheta termodinamicheskikh svoystv [Elektronnyy resurs]. Rezhim dostupa: <http://docs.cntd.ru/document/1200130097> (data obrashcheniya: 29.01.2021). [GOST R 56851-2016. Liquefied natural gas. Method for calculating thermodynamic properties [Electronic resource]. Access mode: <http://docs.cntd.ru/document/1200130097> (date of access: 01/29/2021). (In Russ)]

Сведения об авторе:

Медведков Илья Сергеевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, e-mail: I_Medvedkov@vniigaz.gazprom.ru

Information about the author:

Ilya S. Medvedkov, Cand. Sci. (Technical), Senior Researcher, e-mail: I_Medvedkov@vniigaz.gazprom.ru

Конфликт интересов.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 15.01.2021.

Принята в печать 12.02.2021.

Conflict of interest.

The author declare no conflict of interest.

Received 15.01.2021.

Accepted for publication 12.02.2021.

Для цитирования: А.А. Сидоров, А.К. Ястребов. Интеграция модуля численного решения кинетического уравнения в CFD-пакет для задачи объемной конденсации при истечении парогазовой смеси через сопло. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2021; 48 (1): 65-75. DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-1-65-75

For citation: A. A. Sidorov, A.K. Yastrebov. Integration of the numerical solution module of the kinetic equation into the CFD package for the volume condensation problem of the vapor-gas mixture flow through a nozzle. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2021; 48 (1): 65-75. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-1-65-75

**ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ
POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL MECHANICAL ENGINEERING**

УДК 621.362

DOI: 10.21822/2073-6185-2021-48-1-65-75

**ИНТЕГРАЦИЯ МОДУЛЯ ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ КИНЕТИЧЕСКОГО УРАВНЕНИЯ В
CFD-ПАКЕТ ДЛЯ ЗАДАЧИ ОБЪЕМНОЙ КОНДЕНСАЦИИ ПРИ ИСТЕЧЕНИИ ПАРОГАЗОВОЙ
СМЕСИ ЧЕРЕЗ СОПЛО**

А.А. Сидоров, А.К. Ястребов

*Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
111250, Москва, Красноказарменная ул., 14, Россия*

Резюме. Цель. Интеграция модуля численного решения кинетического уравнения для функции распределения капель по размерам в CFD-пакет. Применение модуля к задаче объемной конденсации при сверхзвуковом истечении парогазовой смеси через сопло в двумерной постановке, сравнение результатов с экспериментальными данными сторонних авторов. **Метод.** В настоящей работе задача об объемной конденсации при сверхзвуковом истечении парогазовой смеси через сопло решается методами конечных элементов в двумерной постановке с использованием пользовательских функций UDF. **Результат.** Представлен модуль для численного решения кинетического уравнения для функции распределения капель по размерам, выполненный в виде пользовательской функции UDF, интегрированной в расчетный CFD-пакет. **Вывод.** Применение модуля к задаче об объемной конденсации при истечении парогазовой смеси через сопло дало качественное во всех областях и количественное согласование в области интенсивной конденсации с экспериментальными данными. Представлены распределения температур, давлений, степени пересыщения как вдоль центральной оси, так и на плоскости, ограниченной контуром расчетной области. Показано, что модуль не зависит от типа решателя (стационарный или нестационарный).

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-90247.

Ключевые слова: объемная конденсация, CFD, методы конечных элементов, прямое численное решение, кинетическое уравнение, сверхзвук, сопло

**INTEGRATION OF THE NUMERICAL SOLUTION MODULE OF THE KINETIC EQUATION
INTO THE CFD PACKAGE FOR THE VOLUME CONDENSATION PROBLEM
OF THE VAPOR-GAS MIXTURE FLOW THROUGH A NOZZLE**

A.A. Sidorov, A.K. Yastrebov

*National Research University «MPEI»,
14 Krasnokazarmennaya St., Moscow 111250, Russia*

Abstract. Objective. Integrating the numerical solution module of the kinetic equation for the droplet size distribution function in a CFD package. Application of the module to volumetric condensation at the supersonic flow of a vapor-gas mixture through a nozzle in a two-dimensional formulation, comparison of the results with experimental data of third-party authors. **Methods.** In this paper, the problem of volume condensation in the supersonic flow of a vapor-gas mixture through a nozzle is

*solved by finite element methods in a two-dimensional formulation using user-defined functions. **Results.** A module for the numerical solution of the kinetic equation for the droplet size distribution function is presented as a user-defined function integrated into the calculated CFD package. **Conclusion.** The module application to volumetric condensation for a vapor-gas mixture flow through the nozzle gave a qualitative agreement in all areas and a quantitative agreement in the area of intense condensation with measurement data. The distributions of temperatures, pressures, and the degree of supersaturation are presented both along the central axis and on the plane bounded by the contour of the computational domain. It is shown that the module does not depend on the solver type (stationary or non-stationary).*

Acknowledgments. *The research was carried out with the financial support of the RFBR in the framework of the scientific project No. 19-38-90247.*

Keywords: *volume condensation, CFD, finite element methods, direct numerical solution, kinetic equation, supersonic sound, nozzle*

Введение. Явление объемной конденсации достаточно широко распространено в природе и технике, однако, ввиду высокой сложности описания сильно неравновесных систем, существует несколько подходов к решению такого рода задач. Одним из таких методов является решение кинетического уравнения для функции распределения капель по размерам [1].

Ранее авторами в работе [2] было рассмотрено сверхзвуковое истечение парогазовой смеси через сопло в одномерном приближении. Однако некоторые задачи требуют рассмотрения в двумерном и даже трехмерном виде.

Постановка задачи. Глобальная задача настоящего исследования – подготовка универсального модуля решения кинетического уравнения для функции распределения капель по размерам, позволяющего проводить исследования фазовых переходов в проточных частях машин и аппаратов криогенной техники, без существенных ограничений по рассматриваемой геометрии и жестких требований к расчетным режимам. С развитием новых технологий, в частности, трехмерного компьютерного моделирования процессов теплообмена и гидродинамики методами конечных объемов (CFD) появилась возможность проектировать сложные машины и агрегаты с существенно меньшими экономическими и временными затратами. Вместе с тем при стремительном росте интереса к CFD-исследованиям современные расчетные пакеты не способны охватить весь спектр научно-инженерных задач. В частности, несмотря на требования турбомашиностроения, модели фазовых переходов, которые с достаточной точностью описывают протекающие процессы, до сих пор не были включены в стандартный функционал.

Методы исследования. В настоящей работе подготовка модуля и его последующая интеграция в расчетный пакет производится на примере решения задачи об объемной конденсации при истечении парогазовой смеси через сопло в двумерной нестационарной постановке. В качестве первого приближения для оценки эффективности работы модуля ставится задача качественного согласования с имеющимися экспериментальными данными [3].

Рассматривается парогазовая смесь, состоящая из азота N₂, выступающего в качестве неконденсирующегося газа-носителя, и паров тяжелой воды D₂O. Выбор компонентов смеси обусловлен наличием экспериментальных данных [3]. Теплофизические свойства компонентов смеси принимаются зависимыми от температуры, [4-6] уравнения термодинамики решаются в приближении сжимаемого идеального газа. Задача решается в однотемпературном приближении, в рамках которого температура капель считается равной температуре газовой фазы. Такой подход является оправданным в случае малой концентрации конденсирующегося компонента в смеси [7]. В настоящей работе количество пара в смеси не превышает 3% по объему. Процессы в пограничном слое, а также турбулентность не учитываются [8].

Математическое описание термодинамики включает в себя систему уравнений, состоящую из уравнений Навье – Стокса для сжимаемого газа, а также уравнения диффузии. В работе используется уравнение состояния для идеального газа. Ударные волны не моделируются, поэтому объемная вязкость не учитывается в уравнениях движения [10]. Используется си-

стема уравнений для сжимаемого газа, включающая в себя уравнения неразрывности, движения, и энергии:

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0; \\ \frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{u}) + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = -\nabla P + \nabla \tau; \\ \frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla \cdot (\rho \vec{u} H) = \nabla [\vec{u} \cdot \tau + \vec{q}] + S_e; \end{cases} \quad (1)$$

где ρ – плотность; \vec{u} – скорость; p – давление, τ – тензор вязких напряжений, q – тепловой поток, E – полная энергия, H – полная энтальпия, T – температура, S_e – объемный источник энергии.

Дополнительное уравнение диффузии, представляющее собой закон сохранения массы для каждого q -го компонента смеси, выглядит следующим образом [11]:

$$\frac{1}{\rho_q} \left[\frac{\partial}{\partial t} (C_q \rho_q) + \nabla \cdot (C_q \rho_q \vec{v}_q) \right] = S_m + \sum_{p=1}^n \left(\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp} \right), \quad (2)$$

где ρ_q – плотность q -того компонента смеси, C_q – его объемная доля, \dot{m}_{pq} – поток массы между p -тым и q -тым компонентом смеси, \dot{m}_{qp} – поток массы между q -тым и p -тым компонентом смеси; S_m – объемный источник массы.

Очевидно, что сумма объемных долей компонентов должна быть равна единице:

$$\sum_{q=1}^n C_q = 1, \quad (3)$$

Кинетическое уравнение для функции распределения капель по размерам в общем виде записывается следующим образом [1]:

$$\frac{\partial f_r}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla f_r + \frac{\partial}{\partial r} (\dot{r} f_r) = \frac{I}{\rho} \delta(r - r_{cr}), \quad (4)$$

где f_r – функция распределения капель по размерам, нормированная на количество капель в единице массы, δ – дельта-функция Дирака, I – скорость нуклеации, \dot{r} – скорость роста капель, r_{cr} – критический радиус капель.

Для того чтобы определить интегральные характеристики конденсационного аэрозоля, например, числовую плотность капель в единице массы, средний размер капель, а также произвести расчет объемных источников массы и энергии, следует рассмотреть моменты функции распределения [12]:

$$\Omega_n = \int_{r_{cr}}^{\infty} r^n f_r dr, \quad (5)$$

Так, например, числовая плотность капель определяется через нулевой момент функции распределения $N_d = \rho \Omega_0$, а средний радиус капель численно равен отношению первого к нулевому моменту: $\bar{r} = \Omega_1 / \Omega_0$.

Иногда также используется функция распределения частиц по размерам, нормированная в единицу объема:

$$f = \rho f_r, \quad (6)$$

Для решения кинетического уравнения, по аналогии с кинетической теорией газов, может использоваться моментный метод, который позволяет получить эквивалентную систему уравнений для первых четырех моментов ($n=0..3$) функции распределения.

Для этого уравнение умножается на r^n и интегрируется по всем значениям радиуса капель, при этом, в случае, когда скорость роста не зависит от радиуса капли, система принимает вид:

$$\frac{d\Omega_n}{dt} = n \dot{r} \Omega_{n-1} + \frac{I}{\rho} r_{cr}^n - \vec{v} \nabla \Omega_n, \quad (7)$$

Капли жидкости могут образовываться из-за случайных флуктуаций в паре, находящемся близко к температуре насыщения. Если температура пара больше температуры насыщения или равна ей, то капли испаряются. В пересыщенном паре капля растет, если ее радиус больше критического:

$$r_{cr} = \frac{2\sigma(T)}{\rho_l(T)RT \ln s}, \quad (8)$$

где $s = p_v/p_s(T)$ – степень пересыщения, σ – коэффициент поверхностного натяжения, R – индивидуальная газовая постоянная, ρ_l – плотность конденсата.

В данной работе для расчета скорости нуклеации используется классическая формула Френкеля – Зельдовича [13]:

$$I = A_0 \exp \left[-\frac{A}{T^3 (\ln s)^2} \right], \quad (9)$$

где $A_0 = (\alpha/\rho_l(T))(p_v/RT)^2 \sqrt{2\mu_v \sigma(T) N_A^3/\pi}$, $A = 16\pi N_A (\sigma(T)/R)^3 (\mu_v/\rho_l(T))^2/3$, α – коэффициент конденсации.

Для определения скорости роста капель используется формула Герца – Кнудсена для однотемпературной постановки [14,15]:

$$r = \frac{\alpha p_s}{p_l(T)} \left(\frac{s-1}{\sqrt{2\pi R_v T}} \right) \quad (10)$$

Рождение новой фазы, т.е. капель конденсата, а также теплообмен, при выполнении необходимых условий, учитывается через объемные источники массы S_m и энергии S_e . При этом объемные источники в рассматриваемой задаче состоят из двух слагаемых, первое слагаемое отвечает за вклад за счет образования капель, а второе за счет их роста.

Объемный источник массы конденсата записывается следующим образом:

$$S_m = \frac{4}{3} \pi r_{cr}^3 \rho_l(T) I + 4\pi \rho_l(T) \rho(T) r \Omega_2, \quad (11)$$

где Ω_2 – второй момент функции распределения капель по размерам. Очевидно, что сток массы для паровой фазы равен S_m по модулю и противоположен по знаку.

Объемный источник энергии имеет следующий вид:

$$S_e = S_m L(T), \quad (12)$$

где $L(T)$ – теплота парообразования.

Использование источниковых членов позволяет существенно упростить решение задачи, так, например, нет необходимости отдельно определять температуру смеси, или считать в явном виде межфазный тепловой поток, расчетный пакет уже имеет необходимые для этого инструменты. В работах других авторов похожей тематики [16, 17] рассматривается объемная конденсация только с учетом образования капель в потоке, однако известно, что последующий рост капель вносит существенный вклад в характеристики потока [18]. Такой подход объясняется тем, что при решении задачи об объемной конденсации только с учетом образования капель нет необходимости решать кинетическое уравнение (4), что сильно усложняет задачу, однако, определить полный спектр характеристик конденсационного аэрозоля при таком подходе не представляется возможным.

Еще одна проблема современных исследований – решение задач в одномерной постановке, ввиду сложности описания систем для задач более высокой размерности. В настоящей работе обе проблемы решены: с одной стороны решение включает в себя как образование капель, так и их рост, а с другой используется сторонний CFD-решатель, позволяющий исследовать объемную конденсацию в двумерных и трехмерных задачах.

Описание модуля решения кинетического уравнения. Интегрируемый в CFD-пакет модуль, позволяющий решать кинетическое уравнение для функции распределения капель по размерам, представляет собой алгоритм, реализуемый посредством пользовательских функций UDF (User Defined Functions), базирующийся на использовании UDM (user-defined memory) – дополнительных ячеек пользовательской памяти, в которые загружаются результаты работы, пригодные для последующей постобработки.

В качестве исходных данных в решатель CFD-пакета загружается расчетная сетка, затем определяется тип граничных условий и задаются начальные условия. Для рассматриваемой в настоящей работе задачи в качестве граничных условий выбирается *Pressure inlet* на входе и *Pressure outlet* на выходе, задаются: полное давление смеси, объемная доля компонентов на входе, а также начальная температура.

Также выбирается тип решателя. Предложенный модуль не имеет ограничений на тип решателя, поэтому может использоваться как для стационарных, так и для нестационарных расчетов. Затем происходит интеграция модуля в решатель CFD-пакета, с последующей инициализацией решения (т.е. присвоением начальных значений параметров в каждой ячейке сетки).

Следом запускается решатель, который останавливается после достижения определенного, заранее заданного уровня невязок для стационарного расчета, либо по окончании так же заранее заданного количества шагов по времени для нестационарного расчета. По окончании расчета производится постобработка полученных результатов – строятся распределения величин в сечениях, на стенках, векторные поля скоростей, а также распределения величин вдоль заранее выбранной траектории при необходимости.

Сам же алгоритм (рис. 1) работает следующим образом: после подгрузки модуля в решатель в каждой расчетной ячейке на каждом шаге по времени (для нестационарного решателя) или на каждой итерации (для стационарного решателя) производится расчет числа Маха M .

Если полученное значение превышает единицу, т.е. течение сверхзвуковое, проверяется условие наличия в данной ячейке паровой фазы (объемная доля пара $S(\text{var})$ должна быть больше нуля). Если паровая фаза присутствует, то определяется степень пересыщения S , а если при этом степень пересыщения выше 1, то производится расчет скорости нуклеации капель I , критического радиуса r_{cr} и скорости роста капель \dot{r} , на основании чего производится решение системы моментных уравнений.

По результатам решения моментов уравнений производится расчет источниковых членов S_e и S_m , величины которых, в свою очередь, передаются в решатель. Алгоритм повторяется до тех пор, пока не будет либо прекращен пользователем, либо по достижении заданной точности.

В настоящий момент, конденсация в дозвуковой части сопла не учитывается, т.к. экспериментальные данные не содержат такой информации для сравнения.

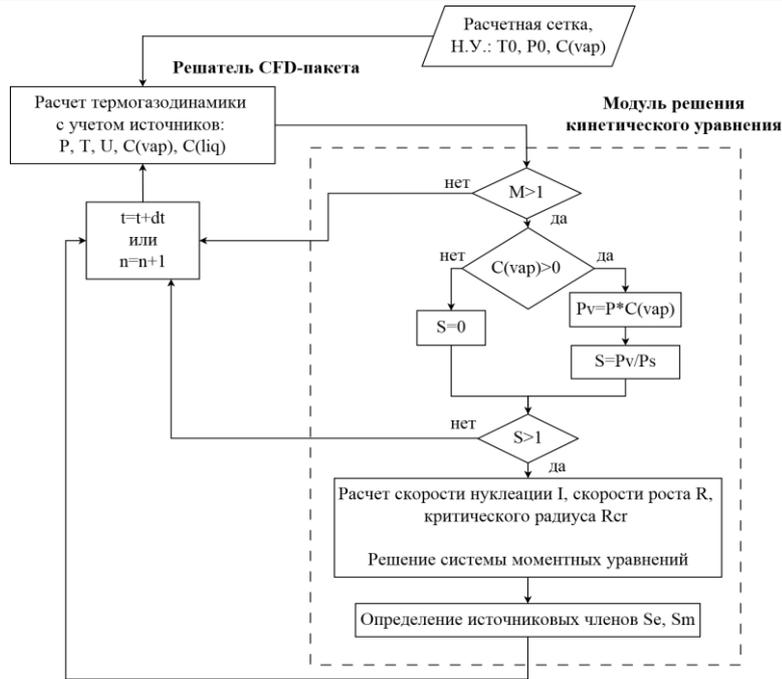


Рис. 1. Блок-схема алгоритма работы модуля решения кинетического уравнения для функции распределения капель по размерам
Fig. 1. Block diagram of the operation algorithm of the module for solving the kinetic equation for the droplet size distribution function

В работе рассматривается плоское щелевое сопло в двумерном виде, представленное на рис. 2.

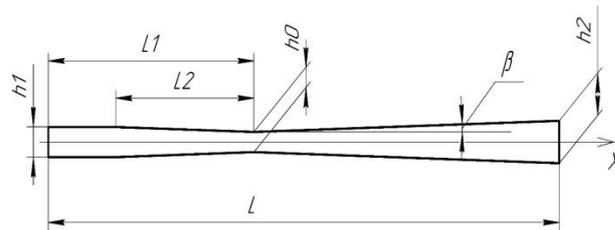


Рис. 2. Общий вид расчетного сопла
Fig. 2. General view of the design nozzle

Размеры расчетного сопла приведены в табл. 1.

Таблица 1. Размеры расчетного сопла
Table 1. Dimensions of the design nozzle

Позиция Position	Размерность Dimension	Обозначение Designation	Значение Meaning
Общая длина Total length	м	L	0.1590
Длина до критического сечения Length to throat		L1	0.0640
Длина сужающейся части Tapered length		L2	0.0430
Высота критического сечения Cut-off height		h0	0.0050
Высота входного сечения Inlet section height		h1	0.0075
Высота выходного сечения Outlet height		h2	0.0106
Угол раскрытия Opening angle		град	β

Фактически, рассматриваемая область является продольным центральным сечением трехмерного сопла. Расчетная сетка представляет собой разбиение области на элементы конечных размеров.

В настоящей работе пограничный слой расчетной сеткой не моделируется, ввиду чего призматические элементы вблизи границ отсутствуют. Расчеты проводились на сетке с гексаэлементами, средний размер которых не превышал 0.1 мм, общее количество элементов ~170000. Фрагмент расчетной сетки представлен на рис. 3.

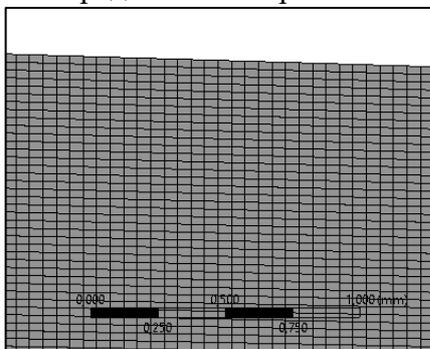


Рис 3. Фрагмент расчетной сетки
 Fig 3. Fragment of the computational grid

Обсуждение результатов. В ходе настоящего исследования были получены распределения относительного давления p/p_0 , температуры смеси T , степени пересыщения s , а также объемной доли образовавшегося конденсата как вдоль центральной оси x (представлена на рис. 2), так и на плоскости, ограниченной контуром расчетной области.

Рабочий режим, на котором производилось сравнение с экспериментальными данными: начальное давление смеси $p_0 = 60400$ Па, начальная температура смеси $T_0 = 298.15$ К, паросодержание ~ 2% по объему от неконденсирующегося компонента.

В работах [3, 19, 20] приведены распределения относительного давления p/p_0 и температуры смеси T , по которым проводится сравнение с расчетными величинами. Сравнение полученных в данной работе результатов расчетов с экспериментальными данными [3, 19, 20] представлено на рис.4.

Используются следующие обозначения кривых: 1 и 3 – экспериментальные и расчетные данные для течения газа без конденсации, 2 и 4 – экспериментальные и расчетные данные при истечении парогазовой смеси с учетом конденсации.

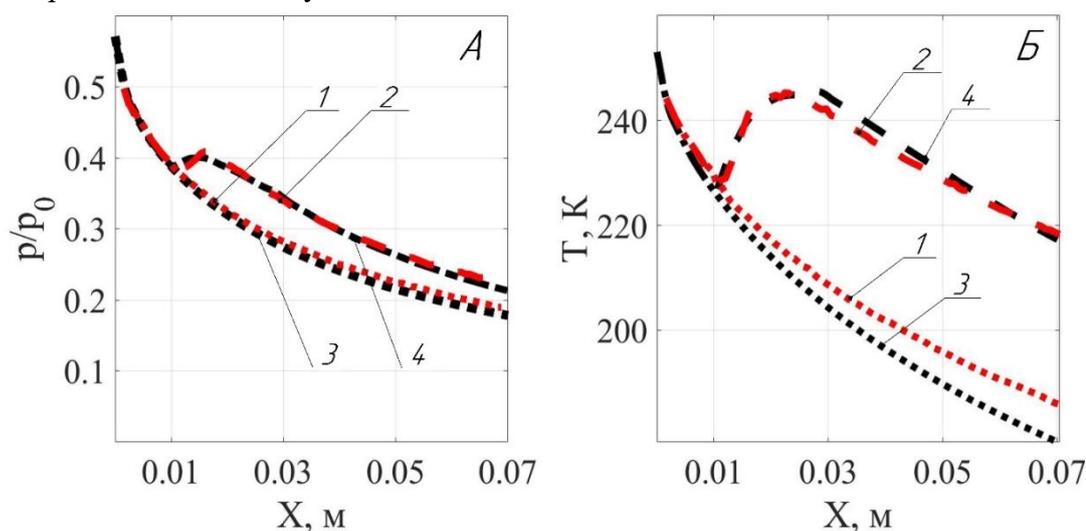


Рис. 4. А – распределение относительного давления p/p_0 вдоль центральной линии, Б – распределение температуры вдоль центральной линии

Fig. 4. A - distribution of relative pressure p / p_0 along the central line, B - temperature distribution along the central line

На рис. 5–8 представлены распределения величин на плоскости, ограниченной контуром расчетной области: давление смеси, температура смеси, степень пересыщения, а также распределение объемной доли жидкости.

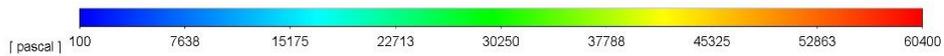


Рис. 5. Распределение давления
Fig. 5. Pressure distribution

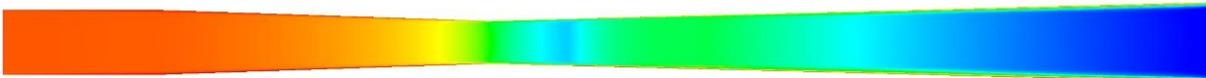
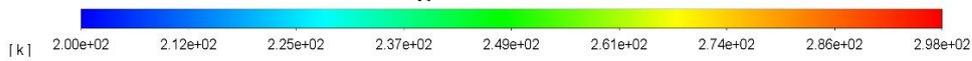


Рис. 6. Распределение температуры
Fig. 6. Temperature distribution

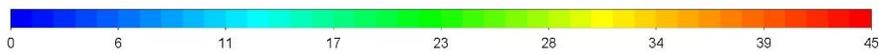


Рис. 7. Распределение степени пересыщения
Fig. 7. Distribution of the degree of supersaturation

На рис. 8 представлено распределение объемной доли жидкости, получившейся в результате конденсации

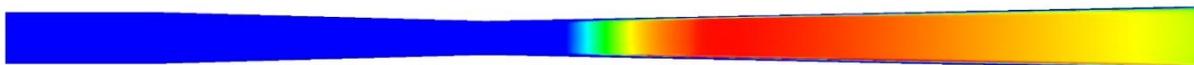


Рис. 8. Распределение объемной доли конденсата
Fig. 8. Distribution of the volume fraction of condensate

На рис. 9 представлены распределения степени пересыщения вдоль центральной линии, полученные для двух типов решателей: 1 – для стационарного (Steady), 2 – нестационарного (Transient) с шагом по времени 10^{-5} с. Для нестационарного решателя показана зависимость после установления стационарного состояния.

Видно, что отличий нет. Таким образом, можно считать, что используемый модуль не имеет ограничений на тип решателя, так как его применение для разных решателей приводит к одинаковым результатам для стационарного процесса.

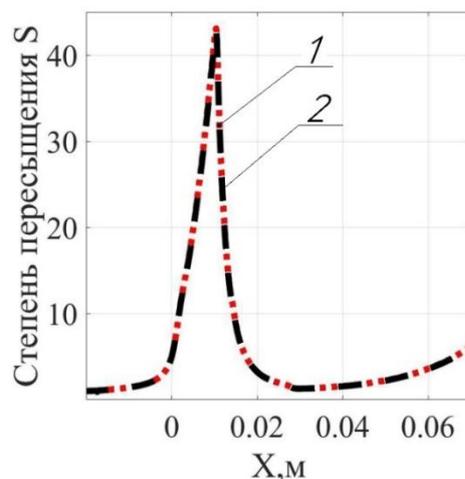


Рис. 9. Распределения степеней пересыщения для двух типов решателей:

1 – стационарный решатель, 2 – нестационарный

Fig. 9. Distributions of degrees of supersaturation for two types of solvers: 1 - stationary solver, 2 - non-stationary

Вывод. Модуль для решения кинетического уравнения для функции распределения капель по размерам успешно интегрирован в среду CFD-пакета. Получены результаты, близкие к экспериментальным, достигнуто качественное во всех областях и количественное согласование в области интенсивной конденсации с экспериментальными данными.

Для достижения количественного согласования результатов планируется следующее: во-первых, необходимо провести исследование сеточной сходимости, т.е. исключить влияние разбиения расчетной области на результат, а во-вторых, необходимо использование более точных зависимостей теплофизических свойств от температуры для компонентов смеси.

Выявлено, что полученный модуль может применяться для решения с использованием любого типа решателя – стационарного или нестационарного. Планируется продолжить работу и использовать модуль для решения задач в трехмерной постановке, в том числе и для задач объемной конденсации в лопастных машинах и аппаратах криогенной техники.

Библиографический список:

1. Стернин Л.Е. Основы газодинамики двухфазных течений в соплах. М.: Машиностроение, 1974.
2. Сидоров А.А., Ястребов А.К. Влияние геометрических характеристик канала и свойств парогазовой смеси на объемную конденсацию при течении в сопле // Теплоэнергетика. 2018. № 1. С. 68-76.
3. Н. Pathak, К. Mullick, S. Tanimura, В. E. Wyslouzil. Nonisothermal Droplet Growth in the Free Molecular Regime. // Aerosol Science and Technology, 47:1310–1324, 2013.
4. Crabtree A. Thermophysical Properties of Saturated Light and Heavy Water for Advanced Neutron Source Applications. Oak Ridge National Laboratory, ORNL/TM- 12322, 1993.
5. Herrig S., Thol M. A Reference Equation of State for Heavy Water // J. Phys. Chem. Ref. Data, Vol. 47, No. 4, 2018.
6. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М., 1972 г., 720 стр.
7. N.M. Kortsenshteyn, A.K. Yastrebov. Interphase heat transfer during bulk condensation in the flow of vapor – gas mixture // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2012. Vol. 55. pp 1133 – 1140.
8. Pope S. B. Turbulent Flows. Cambridge University Press, 2000, 771 с.

9. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Гидродинамика. Издание 6-е. М.: Физматлит, 2015. 728 с. (Теоретическая физика, т. VI).
10. Fluent Theory guide 14, <https://www.ansys.com/Products/Fluids/ANSYS-Fluent>.
11. Лабунцов Д.А., Ягов В.В. Механика двухфазных систем: Учебное пособие для вузов – М.: Издательство МЭИ, 2000, 374 стр.
12. Корценштейн Н.М., Самуйлов Е.В., Ястребов А.К. Новый метод моделирования объемной конденсации пересыщенного пара // Теплофизика высоких температур, 2009, том 47, №1, с. 1-12.
13. Кириллин В.А., Сычев В.В., Шейндлин А.Е. Техническая термодинамика. М.: Издательский дом МЭИ, 2008. С. 271-294.
14. И.Н. Шишкова, А.К. Ястребов. Расчет потока массы пара при изотермической конденсации на сферических каплях в широком диапазоне чисел Кнудсена на основе решения кинетического уравнения Больцмана // Коллоидный журнал, 2016. Т. 78, № 5. С. 660 – 667.
15. И.Н. Шишкова, А.К. Ястребов. Исследование испарения и конденсации в присутствии наночастиц // Коллоидный журнал. 2015. Т. 77. № 5. С. 669 – 675.
16. Xuewen C., Yang L., Xuerui Z., Dan G. Jiang B. Supersonic refrigeration performances of nozzles and phase transition characteristics of wet natural gas considering shock wave effects // Case Studies in Thermal Engineering Volume 24, 100833.
17. A. Giesen, A. Kowalik & P. Roth (2004) Iron-atom condensation interpreted by a kinetic model and a nucleation model approach, Phase Transitions: A Multinational Journal, 77:1-2, 15-129.
18. Shishkova I.N., Kryukov A.P., Levashov V.Y. Vapour–liquid jointed solution for the evaporation–condensation problem // International Journal of Heat and Mass Transfer Volume 141, October 2019, Pages 9-19.
19. Pathak, K. Mullick, S. Tanimura, B. E. Wyslouzil. The structure of D2O-nonane nanodroplets // The Journal of Chemical Physics 140, 224318 (2014);
20. H. Pathak, S. Tanimura, B. E. Wyslouzil. Binary nucleation rates for ethanol/water mixtures in supersonic Laval nozzles: Analyses by the first and second nucleation theorems// The Journal of Chemical Physics 139, 174311 (2013).

References:

1. Sternin L.Ye. Osnovy gazodinamiki dvukhfaznykh techeniy v soplakh. M.: Mashinostroyeniye, 1974. [Sternin L.Ye. Fundamentals of gas dynamics of two-phase flows in nozzles. Moscow: Mechanical Engineering, 1974. (In Russ)]
2. Sidorov A.A., Yastrebov A.K. Vliyaniye geometricheskikh kharakteristik kanala i svoystv parogazovoy smesi na ob'yemnyuyu kondensatsiyu pri techenii v sople // Teploenergetika. 2018. № 1. S. 68-76. [Sidorov A.A., Yastrebov A.K. Influence of the geometric characteristics of the channel and the properties of the vapor-gas mixture on the volumetric condensation during the flow in the nozzle // Teploenergetika. 2018.No. 1.pp. 68-76. (In Russ)]
3. H. Pathak, K. Mullick, S. Tanimura, B. E. Wyslouzil. Nonisothermal Droplet Growth in the Free Molecular Regime. //Aerosol Science and Technology, 47:1310–1324, 2013. [H. Pathak, K. Mullick, S. Tanimura, B. E. Wyslouzil. Nonisothermal Droplet Growth in the Free Molecular Regime. // Aerosol Science and Technology, 47: 1310–1324, 2013. (In Russ)]
4. Crabtree A. Thermophysical Properties of Saturated Light and Heavy Water for Advanced Neutron Source Applications. Oak Ridge National Laboratory, ORNL / TM-12322, 1993.
5. Herrig S., Thol M. A Reference Equation of State for Heavy Water // J. Phys. Chem. Ref. Data, Vol. 47, No. 4, 2018.
6. Vargaftik N.B. Handbook on the thermophysical properties of gases and liquids. M., 1972, 720 pages.
7. N.M. Kortsenshteyn, A.K. Yastrebov. Interphase heat transfer during bulk condensation in the flow of vapor - gas mixture // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2012. Vol. 55. P. 1133 - 1140.
8. Pope S. B. Turbulent Flows. Cambridge University Press, 2000, 771 pp.
9. Landau L. D., Lifshits Ye. M. Gidrodinamika. Izdaniye 6-ye. M.: Fizmatlit, 2015. 728 s. (Teoreticheskaya fizika, t. VI). [Landau L.D., Lifshits EM Hydrodynamics. Edition 6. Moscow: Fizmatlit, 2015.728 p. (Theoretical physics, vol. VI). (In Russ)]
10. Fluent Theory guide 14, <https://www.ansys.com/Products/Fluids/ANSYS-Fluent>. Labuntsov D.A., Yagov V.V. Mechanics of two-phase systems: Textbook for universities - Moscow: MPEI Publishing House, 2000, 374 pp.
11. Labuntsov D.A., Yagov V.V. Mekhanika dvukhfaznykh sistem: Uchebnoye posobiye dlya vuzov – M.: Izdatel'stvo MEI, 2000, 374 str. [Labuntsov D.A., Yagov V.V. Mechanics of two-phase systems: Textbook for universities - Moscow: MPEI Publishing House, 2000, 374 pp. (In Russ)]
12. Kortsenshteyn N.M., Samuylov Ye.V., Yastrebov A.K. Novyy metod modelirovaniya ob'yemnoy kondensatsii peresyshchennogo para // Teplofizika vysokikh temperatur, 2009, tom 47, №1, s. 1-12. [Kortsenshteyn N.M., Samuylov E.V., Yastrebov A.K. A new method for modeling the volumetric condensation of supersaturated steam // Thermophysics of high temperatures, 2009, Vol 47, no. 1-12. (In Russ)]
13. Kirillin V.A., Sychev V.V., Sheyndlin A.Ye. Tekhnicheskaya termodinamika. M.: Izdatel'skiy dom MEI, 2008. S. 271-294. [Kirillin V.A., Sychev V.V., Sheyndlin A.E. Technical thermodynamics. M. : Publishing house MEI, 2008.S. 271-294. (In Russ)]

14. I.N. Shishkova, A.K. Yastrebov. Raschet potoka massy para pri izotermicheskoy kondensatsii na sfericheskikh kaplyakh v shirokom diapazone chisel Knudsen na osnove resheniya kineticheskogo uravneniya Bol'tsmana // Kolloidnyy zhurnal, 2016. T. 78, № 5. S. 660 – 667. [I. N. Shishkova, A.K. Yastrebov. Calculation of the vapor mass flow during isothermal condensation on spherical drops in a wide range of Knudsen numbers based on the solution of the Boltzmann kinetic equation // Colloid Journal, 2016. V. 78, No. 5. pp. 660 - 667. (In Russ)]
15. I.N. Shishkova, A.K. Yastrebov. Issledovaniye ispareniya i kondensatsii v prisutstvii nanochastits // Kolloidnyy zhurnal. 2015. T. 77. № 5. S. 669 – 675. [I.N. Shishkova, A.K. Yastrebov. Investigation of evaporation and condensation in the presence of nanoparticles // Colloid journal. 2015.Vol. 77.No. 5.pp. 669 - 675 (In Russ)]
16. Xuewen C., Yang L., Xuerui Z., Dan G. Jiang B. Supersonic refrigeration performances of nozzles and phase transition characteristics of wet natural gas considering shock wave effects // Case Studies in Thermal Engineering Vol.24, 100833.
17. Giesen, A. Kowalik & P. Roth (2004) Iron-atom condensation interpreted by a kinetic model and a nucleation model approach, Phase Transitions: A Multinational Journal, 77:1-2, 15-129.
18. Shishkova I.N., Kryukov A.P., Levashov V.Y. Vapour–liquid jointed solution for the evaporation–condensation problem // International Journal of Heat and Mass Transfer Volume 141, October 2019, pp.9-19.
19. Pathak, K. Mullick, S. Tanimura, B. E. Wyslouzil. The structure of D2O-nonane nanodroplets // The Journal of Chemical Physics 140, 224318 (2014);
20. H. Pathak, S. Tanimura, B. E. Wyslouzil. Binary nucleation rates for ethanol/water mixtures in supersonic Laval nozzles: Analyses by the first and second nucleation theorems// The Journal of Chemical Physics 139, 174311 (2013).

Сведения об авторах:

Сидоров Александр Андреевич, аспирант, e-mail: SidorovAAn@mpei.ru

Ястребов Арсений Константинович, кандидат технических наук, доцент кафедры низких температур, e-mail: YastrebovAK@mpei.ru

Information about the authors:

Alexander A. Sidorov, Graduate Student, e-mail: SidorovAAn@mpei.ru

Arseniy K. Yastrebov, Cand. Sci. (Technical), Assoc. Prof., Department of Low temperatures, e-mail: YastrebovAK@mpei.ru

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 25.01.2021.

Принята в печать 22.02.2021.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 25.01.2021.

Accepted for publication 22.02.2021.

Для цитирования: В.В. Грызунов. Модель геоинформационной системы FIST, использующей туманные вычисления в условиях дестабилизации. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2021; 48 (1): 76-89. DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-1-76-89

For citation: V.V. Gryzunov. FIST geoinformation system model using fog computing in destabilization. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2021; 48 (1): 76-89. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-1-76-89

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ
COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT

УДК 004.27+004.056

DOI: 10.21822/2073-6185-2021-48-1-76-89

МОДЕЛЬ ГЕОИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ FIST, ИСПОЛЬЗУЮЩЕЙ ТУМАННЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ДЕСТАБИЛИЗАЦИИ

В.В. Грызунов

Российский государственный гидрометеорологический университет,
195027, г. Санкт-Петербург, пр. Металлистов, д. 3, Россия

Резюме. Цель. Цель исследования состоит в разработке модели геоинформационной системы, функционирующей в условиях дестабилизации, а также показатели, оценивающие способность геоинформационной системы выполнять свои функции в условиях дестабилизации. **Метод.** Геоинформационные системы (ГИС) становятся неотъемлемой частью почти всех информационных систем, систем принятия решения. Методы исследования основаны на детерминированной или стохастической модели дестабилизации, однако для ГИС характерна нестохастическая модель. **Результат.** Показано, что любая задача существует в геоинформационной системе в виде расхода четырёх типов производительности: вычислителей, накопителей, каналов связи, устройств ввода/вывода. На основе этого разработана модель геоинформационной системы (FIST - Full Infrastructure of Sources Toolkit), позволяющая оценить «запас прочности» геоинформационной системы, выражающийся в доступной производительности всех четырёх типов. Модель учитывает элементы разной степени мобильности и производительности и пригодна для описания классических, облачных и туманных геоинформационных систем. Приведён пример работы модели в условиях дестабилизации. Сформулирована и доказана теорема о независимости событий, состоящих в решении задач, для любого ориентированного графа. На основе модели предложены интегральный и дифференциальный показатели эффективности. Интегральный показатель характеризует долю решаемых задач за интервал времени, дифференциальный – «запас производительности». **Вывод.** Разработанная модель и показатели эффективности могут применяться при проектировании новых и оценивании существующих геоинформационных систем.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки России (грант ИБ), проект 08/2020.

Ключевые слова: геоинформационная система, туманные вычисления, информационная безопасность, показатели эффективности

FIST GEOINFORMATION SYSTEM MODEL USING FOG COMPUTING IN DESTABILIZATION

V. V. Gryzunov

Russian State Hydrometeorological University,
3 Metallistov Ave., Saint Petersburg 195027, Russia

Abstract. Objective. The objective of the study is to develop a model of a geoinformation system functioning in destabilization, as well as indicators that assess the ability of a geoinformation system to perform its functions in destabilization. **Methods.** Geographic information systems are becoming

ing an integral part of almost all information and decision-making systems. The research methods are based on a deterministic or stochastic model of destabilization, but the geographic information system is characterized by a non-stochastic model. **Results.** It is shown that any task exists in the geoinformation system in the form of consumption of four types of performance: computers, storage devices, communication channels, input/output devices. Based on this, a model of the geoinformation system (FIST – Full Infrastructure of Sources Toolkit) was developed, which allows evaluating the "margin of safety" of the geoinformation system, expressed in the available performance of all four types. The model considers elements of different degrees of mobility and performance and is suitable for describing classical, cloud, and fog geoinformation systems. An example of the model operation in destabilization is given. A theorem on the independence of events of solving problems for any directed graph is formulated and proved. Based on the model, integral and differential efficiency indicators are proposed. The integrated indicator characterizes the share of tasks solved over a time interval; the differential indicator characterizes the "performance margin." **Conclusion.** The developed model and performance indicators can be used to design new and evaluate existing geographic information systems.

Acknowledgments. The reported study was funded by Russian Ministry of Science (information security), project № 08/2020.

Keywords: geoinformation system, fog computing, information security, performance indicators

Введение. Практически все современные направления человеческой деятельности нуждаются в геоинформационных системах (ГИС): «умные» города, системы безопасности и раскрытия преступлений [1], системы предупреждения травм [2], промышленные системы, переходящие на Индустрию 4.0 [3], космический мониторинг [4] и т.д., то есть жизни и здоровье большого количества людей, экономическое процветание компаний и государств попали в зависимость от того, насколько ГИС решает поставленные задачи точно и в срок.

Это привело к тому, что, во-первых, ГИС столкнулись с проблемой ввода и обработки больших неструктурированных данных в реальном масштабе времени, во-вторых, ГИС стали объектом злоумышленных действий. Всё обозначенное дестабилизирует работу ГИС, то есть нарушает такой аспект информационной безопасности как доступность, и ставит вопрос о том, насколько эффективна ГИС в условиях дестабилизации.

Постановка задачи. Цель исследования состоит в разработке модели ГИС, функционирующей в условиях дестабилизации, и предложить показатели, описывающие способности ГИС адаптироваться к дестабилизации.

Обычно вопросы доступности решают с помощью резервирования и балансировки нагрузки. Однако скорость прироста пользователей и задач настолько велика, что централизованными способами вопросы доступности решить не представляется возможным по причине большой стоимости решений и появления новых рисков. Так, например, от метеокомплексов ожидается прирост поставляемых данных больше, чем в 200 раз [5], а метеообстановка – лишь один из нескольких сотен слоёв современной ГИС.

От проблем централизованной и облачной обработки данных свободны туманные вычисления, которые активно разрабатываются компаниями CISCO, Microsoft, Intel и другими [6].

Методы исследования. Применение туманных вычислений для решения проблем ГИС и предоставления услуг ГИС в модели Fog-as-a-Service исследовалось многими авторами. Так, например, в [7] рассматривают ГИС через призму Web-приложения, но оставляют за скобками программно-аппаратные платформы, в [8] делают акцент на задержке обработки запросов к геопространственным данным и снижению энергопотребления, то есть решают частную задачу. Исследователи в работе [9] используют статистические оценки для определения надёжности узла тумана (fog node) и назначают узел в два этапа: выбор кластера тумана и выбор узла тумана, который способен выполнить задачу, упускают из виду ситуацию, когда объём требуемого ресурса не может быть предоставлен одним узлом, но может быть собран из нескольких узлов меньшего объёма.

Существующие модели ГИС, построенные на базе туманных вычислений, не позволяют оценить эффективность адаптации к дестабилизации и имеют следующие ограничения:

- ориентированы на один-два типа ресурса ГИС: вычислители или каналы связи;

– основаны на детерминированной или стохастической модели дестабилизации, однако для ГИС в общем случае характерна нестохастическая модель, т.к. имеет место агрессивная целенаправленная среда функционирования [10].

Рассмотрим модель ГИС свободную от указанных недостатков и предложим показатели эффективности адаптации ГИС к дестабилизации, вызванной как увеличением потока решаемых задач, так и действиями злоумышленников.

Любая ГИС как информационная система представляется в виде четырёх типов ресурсов: вычислителей (C), каналов связи (L), памяти (Sp), устройств ввода/вывода (Tr) $\{C, L, Sp, Tr\}$ [11].

Соответственно, каждый тип ресурса имеет свою производительность и свои единицы измерения $\{\omega_C \in \Omega_C, \omega_L \in \Omega_L, \omega_{Sp} \in \Omega_{Sp}, \omega_{Tr} \in \Omega_{Tr}\}$: Floating-point Operations Per Second (FLOPS), ГГц, бит/с, листы/минуту, frames per seconds (FPS) и др. Чтобы ГИС решала поставленные задачи, необходимо иметь в наличии все типы производительностей.

Аксиома необходимости.

$$\Omega > 0 \Leftrightarrow ((\Omega_C \neq 0) \wedge (\Omega_L \neq 0) \wedge (\Omega_{Sp} \neq 0) \wedge (\Omega_{Tr} \neq 0)) = 1$$

При этом сведение к нулю любого из типов производительности достаточно, чтобы вывести из строя всю ГИС.

Достаточное условие полной потери работоспособности ГИС (следствие аксиомы).

$$\Omega = 0 \Rightarrow ((\Omega_C = 0) \vee (\Omega_L = 0) \vee (\Omega_{Sp} = 0) \vee (\Omega_{Tr} = 0)) = 1$$

Здесь не имеет значение, каким образом утрачен тип производительности: по причине разрушения вычислителей, каналов связи, устройств ввода/вывода, накопителей ГИС, либо в силу переизбытка задач. В любом случае возникает ситуация, при которой текущей производительности недостаточно $\Omega < \Omega^{Треб}$.

Под *требуемой производительностью* ($\Omega^{Треб}$) будем понимать производительность, которая нужна задаче, чтобы выполняться в заданное время с заданной точностью. *Текущей производительностью* (Ω) обозначим производительность, которая доступна в текущий момент времени в геоинформационной системе и может быть выделена задаче.

Производительность $\Omega^{ГИС}$ – это производительность всей ГИС и измеряется количеством задач K , решённых ГИС за заданное время T .

$$\Omega^{ГИС} = \frac{K}{T} \quad (1)$$

Поскольку ГИС представлена в виде набора производительностей, то логично представить решаемые задачи также через набор производительностей. Дополнительно следует отметить, что у каждой k -й задачи ($0 \leq k \leq K^*$) есть время (t^k) и точность (δ^k), с которыми она должна быть решена, а также допустимые отклонения по времени (Δt^k) и точности ($\Delta \delta^k$). Используя допустимые отклонения, можно в экстренной ситуации сократить требования к ресурсам в несколько раз [12].

$$\langle \{\Omega_C^k(t), \Omega_L^k(t), \Omega_{Sp}^k(t), \Omega_{Tr}^k(t)\}, t^k, \Delta t^k, \delta^k, \Delta \delta^k \rangle ,$$

где

$k = \overline{1, K^*}$, K^* – количество поставленных перед ГИС задач,

$\Omega_C^k(t), \Omega_L^k(t), \Omega_{Sp}^k(t), \Omega_{Tr}^k(t)$ – необходимые для k -й задачи производительности вычислителей, каналов связи, памяти, устройств ввода/вывода.

Удобно описывать информационно-управляющие зависимости задач ориентированным графом G , дуги которого характеризуют направление передачи управляющих воздействий и информационных сигналов, а вершины – решаемые задачи. Интуитивно кажется, что в случае с информационными и управляющими зависимостями задач друг от друга, событие, состоящее в том, что k -я задача будет решена, также зависит от решения других задач. Однако это не так. На самом деле события являются независимыми для любого ориентированного графа G . Понимание этого факта существенно упрощает оценивание эффективности ГИС через её производительность.

Теорема. Пусть дан ориентированный граф G , отражающий зависимости между задачами. Тогда события, состоящие в решении задач, являются независимыми для любого ориентированного графа.

Допущение. ГИС является динамической системой [13], то есть ситуация в момент времени t не влияет на ситуацию в моменты $t-1, t-2, \dots$ (ситуация в моменты времени $t+1, t+2, \dots$ не влияет на ситуацию в момент t).

Доказательство. Возьмём произвольный сегмент графа из двух вершин. Все возможные варианты связей на этом графе сводятся к четырём случаям (рис.1.):



Рис.1. Варианты взаимосвязей задач

Fig.1. Task relationship options

1. Сегмент несвязен. Независимость событий друг от друга очевидна.
2. Задача A предшествует задаче B .

Вероятность совместного решения задач A и B находится по формуле

$$P(AB) = P(A)P(B/A) = P(B)P(A/B)$$

Поскольку мы допустили, что задача B никак не влияет на решение задачи A , то

$$P(A/B) = P(A), \text{ отсюда следует, что}$$

$$P(A)P(B/A) = P(B)P(A).$$

При условии, что $P(A) \neq 0$, сократим обе части равенства на $P(A)$, в результате $P(B/A) = P(B)$,

следовательно, события «решение задачи B » и «решение задачи A » независимы, что и требовалось доказать.

3. Задача B предшествует задаче A . Независимость событий доказывается аналогично случаю 2.

4. Задача B с задачей A и задача A связана с задачей B . Поскольку приведённые на графе задачи взаимосвязаны, значит, они выполняются одна за другой. Поэтому случай 4 представляется как последовательность случаев 2 и 3, для которых независимость задач уже доказана.

Вариант с двумя вершинами произвольного графа G легко распространяется на любое количество вершин. В силу того, что в доказательстве использовался произвольный сегмент, считаем теорему доказанной.

С учётом независимости задач построим модель ГИС.

Модель ГИС. Современная ГИС включает в себя активные и пассивные элементы, способные в разной степени влиять на её конфигурацию. Если элементы способны изменять конфигурацию ГИС или перемещаться в пространстве, то это – активные элементы: мобильные телефоны, ноутбуки, мобильные серверы, метеозонды, беспилотные аппараты и т.д., и активное сетевое оборудование: свитчи, роутеры, модемы и т.д. Остальные элементы ГИС назовём пассивными.

В работе ГИС условно можно выделить два режима: штатный и в условиях дестабилизации.

Модель ГИС в штатном режиме. Поскольку ГИС имеет в своём составе активные элементы, и основана на туманных вычислениях (fogcomputing), то её структура и функции изменяются во времени, то есть изменяется объект управления. Это вносит дополнительную сложность в управление ресурсами (fognodes), потому что перед выдачей управляющих воздействий необходимо провести процедуру идентификации объекта управления.

Управлять туманными вычислениями централизованно довольно сложно, поэтому имеет смысл изучить варианты децентрализации управления: посредством создания иерархии или делегирование некоторых функций управления. ГИС обычно располагается на территории разных государств и выполняет задачи, конкурирующие друг с другом, а значит делегирование управления сталкивается с рядом организационных проблем. Поэтому остановимся на создании иерархии в управлении [14]. В работе [15] доказывается преимущество иерархических систем перед плоскими.

Система управления – это сочетание объекта управления и управляющего элемента [16]. В ГИС явно присутствуют две страты:

1. Страта-сервис. Пользователи используют ГИС именно как сервис, предоставляющий им услуги. Назовём эту страту уровнем программного обеспечения (уровнем ПО, УПО).

2. Физические элементы ГИС – это уровень физической структуры (уровень ФС, УФС). Вектор v характеризует текущее состояние элемента УФС

$$v = [v_x, v_r, v_y, v_\omega, v_v, v_s, v_l]^T,$$

где v_x – текущее положение элемента в пространстве-времени;

v_r – местонахождение элементов, с которыми есть физическая связь;

v_y – местонахождение элементов, с которыми есть логическая связь;

v_ω – текущие производительности элемента УФС $\{\omega_c^B, \omega_{sp}^B, \omega_{tr}^B, \omega_l^B\}$;

v_v – скорости перемещения элемента в пространстве;

v_s – энергозапас (измеряется ёмкостью энергетических частей или временем активного существования);

v_l – число связей, потенциально образуемых элементом УФС.

Вектор v имеет ограничения $v: v \leq v^*$.

Пользователи оценивают эффективность ГИС по тому, насколько удовлетворяет их ожидания и потребности страта-сервис, т.е. через уровень ПО: работоспособность слоёв ГИС, специальных трекинговых программ, систем построения аналитических отчётов и т.п., т.е. сколько задач способна решить ГИС за отведённое время.

Физические элементы, относящиеся к уровню ФС характеризуются «тактовой частотой», «средней пропускной способностью канала», «количеством точек на дюйм» и др. Очевидно, отсутствует уровень, где показатели УФС транслируются в показатели УПО. Добавим этот уровень и определим его как уровень логической структуры ГИС (уровень ЛС, УЛС).

На уровне ЛС создаётся виртуальная структура [17], состоящая из пулов ресурсов (fognodes), требуемых для решения задач УПО: транков, кластеров и др. Элементы уровня ФС создают физическую структуру, которая «вмещает в себя» виртуальные пулы. Метауровнем в ГИС является уровень ФС. Он задаёт требуемые пространственно-временные состояния уровню ЛС. УЛС, в свою очередь, выступает метауровнем для уровня ПО и формирует его множество требуемых пространственно-временных состояний. Влияние метауровней и «вложенных» уровней друг на друга проанализировано в работе [18].

Главной функцией УПО является выполнение пользовательских задач с требуемой точностью за требуемое время, то есть отображение множества ресурсов, доступных уровню ПО, во множество пользовательских задач:

$$f^{УПО}: \{ \langle C, \omega_C \rangle, \langle Sp, \omega_{Sp} \rangle, \langle Tr, \omega_{Tr} \rangle, \langle L, \omega_L \rangle \} \rightarrow K.$$

Задача решается только на конкретных физических устройствах, то есть на уровне ФС, поэтому для удовлетворения потребностей пользователя уровень ПО запрашивает необходимый физический ресурс, но не непосредственно, а через уровень ЛС (рис.2).

Получив запрос на ресурс от уровня ПО, уровень ЛС преобразует требования к производительности уровня ПО (объекты в час, запросы в секунду, размер слоя ГИС и т.д.) в показатели, характерные для физических устройств (точки на дюйм, ГГц, GFLOP, Гбайт и т.п.) и запрашивает ресурсы на уровне ФС. Уровень ФС должен предоставить ресурс. Если запрашиваемого ресурса в наличии нет, то уровень ЛС работает с тем, что есть, и пытается сформировать пул, с производительностью, запрошенной уровнем ПО:

$$f^{УЛС} = [f_c^{УЛС}, f_{sp}^{УЛС}, f_{tr}^{УЛС}, f_l^{УЛС}]^T$$

$$f_c^{УЛС}: \{ \langle C^B, \omega_C^B \rangle \} \rightarrow \{ \langle C, \omega_C \rangle \},$$

$$f_{sp}^{УЛС}: \{ \langle Sp^B, \omega_{Sp}^B \rangle \} \rightarrow \{ \langle Sp, \omega_{Sp} \rangle \},$$

$$f_{tr}^{УЛС}: \{ \langle Tr^B, \omega_{Tr}^B \rangle \} \rightarrow \{ \langle Tr, \omega_{Tr} \rangle \},$$

$$f_l^{УЛС}: \{ \langle L^B, \omega_L^B \rangle \} \rightarrow \{ \langle L, \omega_L \rangle \},$$

где

$\{ \langle C^B, \omega_C^B \rangle \}$, $\{ \langle Sp^B, \omega_{Sp}^B \rangle \}$, $\{ \langle L^B, \omega_L^B \rangle \}$, $\{ \langle Tr^B, \omega_{Tr}^B \rangle \}$ – соответственно множества вычислителей, накопителей, каналов связи, устройств ввода/вывода и их производительности на уровне ФС;

$\{<C, \omega_C>\}$, $\{<Sp, \omega_{Sp}>\}$, $\{<L, \omega_L>\}$, $\{<Tr, \omega_{Tr}>\}$ – соответственно, множества пулов, созданные из вычислителей, накопителей, каналов связи, устройств ввода/вывода и их производительности на уровне ЛС;
 $f_C^{УЛС}$, $f_{Sp}^{УЛС}$, $f_L^{УЛС}$, $f_{Tr}^{УЛС}$ – функции, отображающие множества физических ресурсов в образованные пулы, соответственно, для вычислителей, накопителей, каналов связи, устройств ввода/вывода;

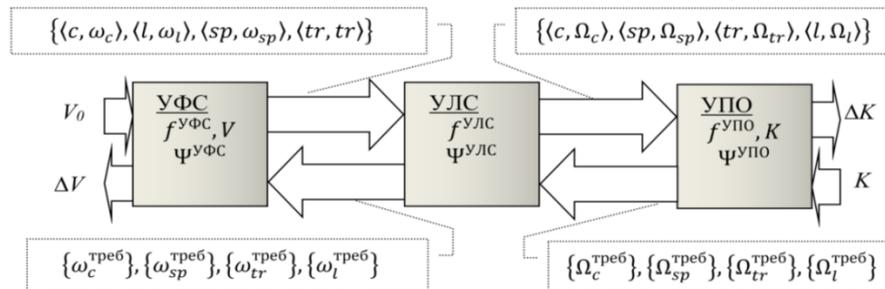


Рис. 2. Уровни геоинформационной системы в модели FIST и связи между ними

Fig.2. The geographic information system levels in the FIST model and the relationship between them

V^0 , V , ΔV – начальное и текущее множество элементов физического уровня и его изменение;
 Ψ – дестабилизация уровня (подробнее ниже в статье).

Дополнительно уровень ЛС решает задачи по преобразованию одного типа ресурсов (типа производительности) в другой. Например, сырые данные метеодатчиков, загружаемые в ГИС требуют 10 Мбод от канала связи и процессора 1ГГц на 20 секунд. Но если данные предварительно обработать на самом датчике, то требования изменятся: 2 Мбод канала связи и процессор 1,5 ГГц на 120 секунд. При этом энергозапас датчика расходуется быстрее, чем в работе с сырыми данными.

Чтобы иметь возможность преобразовать один тип производительности в другой, необходимо выявить соответствующие закономерности. На сегодня известны некоторые из них.

$$\left\{ \begin{array}{l} \Omega^{УЛС} \leq \sum_{i=1}^N \omega_i \quad \text{Элементы соединены параллельно} \\ \Omega^{УЛС} \leq \min_{i=1, N}(\omega_i) \quad \text{элементы соединены последовательно} \end{array} \right. \quad (2)$$

Если ресурсы в пуле каналов связи или вычислителей соединены параллельно, то общая производительность пула не превосходит сумму производительностей всех элементов пула. Если – последовательно, то общая производительность пула равна худшей производительности элемента.

Пул с требуемой физической производительностью уровень ЛС формирует путём выдачи команд на перемещение/ коммутацию элементов уровня ФС.

Главное назначение уровня ФС заключается в распределении в пространстве-времени физической производительности таким образом, чтобы уровень ЛС получил возможность собрать пул с требуемой производительностью:

$$f^{УФС} = [f_C^{УФС} \ f_{Sp}^{УФС} \ f_{Tr}^{УФС} \ f_L^{УФС}]^T$$

$$f_C^{УФС}: v_\omega \rightarrow \{ \langle C^B, \omega_C^B \rangle, v'_\omega \},$$

$$f_{Sp}^{УФС}: v_\omega \rightarrow \{ \langle Sp^B, \omega_{Sp}^B \rangle, v'_\omega \},$$

$$f_{Tr}^{УФС}: v_\omega \rightarrow \{ \langle Tr^B, \omega_{Tr}^B \rangle, v'_\omega \},$$

$$f_L^{УФС}: v_\omega \rightarrow \{ \langle L^B, \omega_L^B \rangle, v'_\omega \},$$

где

v' – новое состояние элемента УФС;

$f_C^{УФС}$, $f_{Sp}^{УФС}$, $f_L^{УФС}$, $f_{Tr}^{УФС}$ – функции, распределяющие в пространстве-времени, соответственно, физические ресурсы вычислителей, накопителей, каналов связи, устройств ввода/вывода.

Согласно введённому выше определению, корректировать своё положение в пространстве и изменять конфигурацию ГИС способны только активные элементы. Такие изменения подробно изучаются в теории киберфизических, голономных систем [19] и описываются дифференциальными уравнениями движения, радиофизики, электротехники, оптики и др.

В случаях, когда физический ресурс не может быть распределён требуемым образом в пространстве, данные об этом передаются уровню ЛС. Уровень ЛС пытается собрать из других элементов новый пул, имеющий требуемую производительность.

Если и новый пул не может быть собран, то уровень ЛС выбирает пул, имеющий наибольшую производительность, и передаёт уровню ПО. Уровень ПО решает задачи пользователя, исходя из доступных ресурсов, при необходимости используя допустимые для задач погрешности [12].

Приведём пример моделирования беспилотной системы обнаружения и реагирования военной морской базы ВМФ (UDRS), поставляющей данные об охраняемом периметре в ГИС корабля в реальном масштабе времени.

Пусть необходимо патрулировать внешний периметр в 5000 км беспилотной группой (БГ). Активные элементы моделируемой системы: беспилотные летательные аппараты (БПЛА) типа «Орлан 10» и пассивные элементы – пульта управления БПЛА (ПУ) [20].

Состав БГ включает 4 БПЛА и 1 ПУ. БПЛА могут ретранслировать сигналы друг друга в ПУ. Начальные векторы состояний элементов приведены в табл. 1.

Таблица 1. Начальные векторы состояний элементов

Начальный вектор состояния V_{0}^{HP} БГ	Начальный вектор состояния V_{0}^{TV} ПУ
$v_x = [0; 0]$ – текущее положение $v_r = [-; -]$ – местонахождение элементов, с которыми есть физическая связь $v_y = [-; -]$ – координаты элементов, с которыми связан логически v_ω – текущие производительности $\omega_c^B = 1,6 \text{ ГГц}, \omega_{sp}^B = 1 \text{ Гб}, \omega_{tr}^B = 200 \text{ км/ч}, \omega_l^B = 11 \text{ Мб/с}$. $v_v = [100 \text{ км/ч}; 0 \text{ км/ч}]$ – максимальная и текущая скорость перемещения $v_s = 18 \text{ ч}$ – энергетические запасы БПЛА $v_l \leq 4-3$ соединения с БПЛА из БГ, и одно для подключения к ПУ	$v_x = [0; 0]$ – текущее положение $v_r = [-; -]$ – местонахождение элементов, с которыми есть физическая связь $/v_x - v_r / \leq 120 \text{ км}$ – ограничения на удалённость БПЛА $v_y = [-; -]$ – координаты элементов, с которыми связан логически v_ω – текущие производительности $\omega_c^B = 1,6 \text{ ГГц}, \omega_{sp}^B = 1 \text{ Гб}, \omega_{tr}^B = 800 \text{ км/ч}, \omega_l^B = 11 \text{ Мб/с}$. $v_v = [0 \text{ км/ч}; 0 \text{ км/ч}]$ – максимальная и текущая скорость перемещения $v_s = \infty$ – энергетические запасы ПУ $v_l \leq 5$ – максимальное допустимое количество БПЛА, подключаемых к ПУ, равно 4 и одно подключение к серверу

Table 1. Initial vectors of elements states

Initial state vector V_{0}^{HP} unmanned group	Initial state vector V_{0}^{TV} remote control
$v_x = [0; 0]$ – current position $v_r = [-; -]$ – elements coordinate with which there is a physical connection $v_y = [-; -]$ – elements coordinate with which there is a logical connection v_ω – current performance $\omega_c^B = 1,6 \text{ ГГц}, \omega_{sp}^B = 1 \text{ Гб}, \omega_{tr}^B = 200 \text{ км/ч}, \omega_l^B = 11 \text{ Мб/с}$. $v_v = [100 \text{ км/ч}; 0 \text{ км/ч}]$ – maximum and current travel speed $v_s = 18 \text{ ч}$ – энергетические запасы БПЛА $v_l \leq 4 - 3$ connections with UAVs of unmanned group, and one for connection for remote control	$v_x = [0; 0]$ – current position $v_r = [-; -]$ – elements coordinate with which there is a physical connection $/v_x - v_r / \leq 120 \text{ км}$ – limits on the distance of the UAV $v_y = [-; -]$ – elements coordinate with which there is a logical connection v_ω – current performance $\omega_c^B = 1,6 \text{ ГГц}, \omega_{sp}^B = 1 \text{ Гб}, \omega_{tr}^B = 800 \text{ км/ч}, \omega_l^B = 11 \text{ Мб/с}$. $v_v = [0 \text{ км/ч}; 0 \text{ км/ч}]$ – maximum and current travel speed $v_s = \infty$ – энергетические запасы ПУ $v_l \leq 5$ – the maximum allowable number of UAVs connected to the remote control is 4 and one connection to the server

Информация о ходе патрулирования передаётся на ПУ. Длина периметра 5000км (рис.3). Время патрулирования $T=10$ ч. Трансляция изображения должна быть не хуже 200км/0,5ч, чтобы обеспечить требуемую точность локализации нарушителя периметра.

БГ летят один за другим. Чтобы покрыть защищаемый периметр в 5000км с учётом ограничения на максимальное расстояние «Орланов» до ПУ $v_1 \leq 120$ км, требуется $5000/120 \approx 42$ комплекта БГ.

Количество комплектов можно сократить, переместив ПУ в центр окружности. Тогда расстояние до ПУ в 120км будет максимально допустимым радиусом окружности (диаметр 240км). Следовательно, для патрулирования необходимо $5000/240 \approx 21$ комплект БГ.

Количество решаемых задач $K=1$. Считаем, что $\omega_c^B = 1,6$ ГГц, $\omega_{sp}^B = 1$ Гб, $\omega_l^B = 11$ Мб/с достаточно для решения поставленных задач, поэтому опишем задачу так:

$$K = \{ \langle \omega^k = \omega_{Tr}^{Треб} = 200 \text{ км} / 0,5 \text{ ч}, t^k = 10 \text{ ч}, \Delta t^k = 0, \delta^k = 5 \text{ м}, \Delta \delta^k = \pm 1 \text{ м} \rangle \}$$

Пользователь на срок $t^k = 10$ ч через УПО требует ресурс $\omega_{Tr}^{Треб} = 400$ км/ч. УЛС транслирует уровню ФС запрос на срок $t^k = 10$ ч ресурса $\omega_{Tr}^{B, Треб} = 200$ км/0,5ч.

Однако, согласно исходным данным, такого ресурса нет в наличии. УФС имеет только $\omega_{Tr}^B = 200$ км/ч на больший срок $t = 18$ ч. УФС имеет 4 БПЛА в комплекте с таким ресурсом. Данные об этом возвращаются уровню ЛС. На уровне ЛС делается вывод о том, что для решения поставленной задачи необходим пул ресурсов. Учитывая (2), для предоставления $\omega_{Tr}^{Треб} = 200$ км/0,5ч необходимо объединение в пул двух БПЛА. УЛС формирует пул из имеющихся БПЛА, удовлетворяющий запрос пользователя, закладывает данные об этом в БГ. БГ начинает работу согласно заложенной программе, реализуемой собственной системой управления.

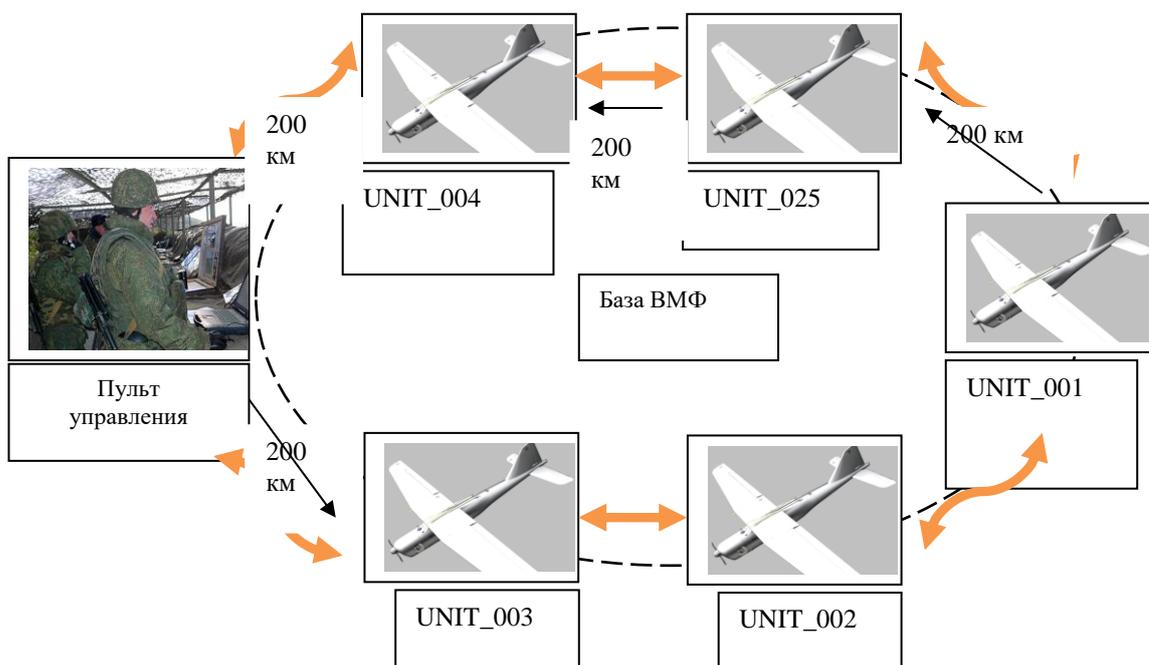


Рис.3. Моделирование UDRS
 Fig.3. UDRS modeling

Модель ГИС в условиях дестабилизации. С точки зрения управления ГИС представляется как объект, имеющий функции (терминальная модель), или как объект, обладающий структурой (графовая модель). Поэтому дестабилизация ГИС (Ψ), возникающая в ходе эксплуатации, связана с разрушением функций (Ψ_F) или структуры ГИС (Ψ_S). Сформулируем это утверждение в виде аксиомы.

Аксиома дестабилизации. Дестабилизация Ψ влияет только на функции Ψ_F и/или структуру Ψ_S ГИС:

$$\Psi = \Psi_F \cup \Psi_S.$$

Обратим внимание, что в модели FIST ничего не говорится о причинах дестабилизации. Значение имеют только последствия.

Все возможные варианты дестабилизации описаны в документе [21]. Согласно модели FIST, дестабилизация классифицируется по уровням ГИС $\Psi = \{\Psi^{УПО}, \Psi^{УЛС}, \Psi^{УФС}\}$ следующим образом (рис. 2):

1. Дестабилизация уровня ПО $\Psi^{УПО} = \Psi_S^{УПО} \cup \Psi_F^{УПО}$: атаки типа Slowloris, применение exploits, умышленный или нет запуск вредоносного программного кода пользователями, создание избыточного потока задач и т.д. Дестабилизация выражается в изменении распределения задач по ресурсам, изменяется количество решённых задач $\Psi_S^{УПО} = \{\Delta f^{УПО}, \Delta K\}$.
2. Дестабилизация уровня ЛС $\Psi^{УЛС} = \Psi_S^{УЛС} \cup \Psi_F^{УЛС}$: нарушение штатного режима функционирования ГИС путём перегрузки созданных пулов (fognodes), сбои в системе управления пулами, разрушение самих пулов с помощью программных или программно-аппаратных средств и т.п. Возможно изменение в структуре пулов $\Psi_S^{УЛС} = \{\Delta f^{УЛС}, \Delta\{C, Sp, Tr, L\}\}$ и в их функциональной части – производительности $\Psi_F^{УЛС} = \{\Delta\omega_c, \Delta\omega_{sp}, \Delta\omega_{tr}, \Delta\omega_l\}$.
3. Дестабилизация уровня ФС $\Psi^{УФС} = \Psi_S^{УФС} \cup \Psi_F^{УФС}$: выход из зоны видимости мобильных элементов ГИС, использование технических средств для несанкционированного доступа, паразитное электромагнитное излучение, потоки отказов или сбоев оборудования, хищение элементов ГИС и т.п., то есть имеет место вывод из строя элементов ГИС, разрушение каналов связи $\Psi_S^{УФС} = \{\Delta f^{УФС}, \Delta\{C^B, Sp^B, Tr^B, L^B\}\}$. С точки зрения функций дестабилизация проявляется в изменении векторов состояний $\Psi_F^{УФС} = \{\Delta V\}$.

Обсуждение результатов. На приведённом выше примере с патрулированием периметра рассмотрим работу модели FIST.

В примере пользователь поставил перед ГИС единственную задачу: патрулирование периметра. Следовательно, зависимости задач между отсутствуют, и $\Psi_S^{УПО}$ ограничено только структурным разрушением программного обеспечения, управляющего БГ.

$\Psi_F^{УПО}$ может возникнуть, например, если появятся данные о новом более быстром объекте, нарушающем периметр, что потребует увеличения до $\omega_{Tr}^{Треб}$ с 200км/0,5ч до 200км/0,25ч. Адаптация ГИС к дестабилизации в данном случае состоит в создании на уровне ЛС нового пула с большей разрешающей способностью. Это потребует изменить состояния элементов уровня ФС: количество БПЛА и порядок их следования.

В том случае, если по каким-то злоумышленным или естественным причинам (компьютерные вирусы, действия диверсионно-разведывательных групп, естественный отказ каналов связи и пр.) некоторые БПЛА будут выведены из строя $\Psi_S^{УЛС} = \{\Delta f^{УЛС}\}$, $\Psi_F^{УЛС} = \{\Delta\omega_l\}$, придётся создавать новые пулы, чтобы сохранить требования пользователей (требования уровня ПО) к производительности.

$\Psi_F^{УФС}$ возникает, когда злоумышленник установит генератор помех, изменяющий $\omega_l^B \ll 11 \text{ Mb/s}$. В результате нарушится передача снятого изображения с БПЛА в ПУ, что проявится на уровне ЛС в виде разрушения пула, и точность обнаружения упадёт. Один из вариантов адаптации к дестабилизации заключается в переносе некоторых частей обработки изображения на борт БПЛА, что сократит требования к каналу передачи данных и позволит сохранить качество обнаружения.

Поскольку ГИС, использующая туманные вычисления, имеет много элементов, то существует большое количество возможных структур ГИС и вариантов адаптации к дестабилизации.

ции. Живучесть неоднородных структур и выбор оптимальной структуры рассмотрены в [22]. Для выбора варианта адаптации необходим соответствующий показатель эффективности.

Известные показатели эффективности, характеризующие стоимость системы [23], снижение рисков информационной безопасности [24] мало говорят о том, пригодна ГИС для решения поставленных задач или нет. Показатели, оптимизирующие надёжность структуры, вероятность безотказной работы [25] или средние времена восстановления [11], частично отвечают на вопрос о пригодности структуры ГИС решать задачи, но они упускают функциональные возможности, требуют время на проведение статистических испытаний и не могут рассчитываться в реальном масштабе времени.

Все приведённые показатели не учитывают тот факт, что структура ГИС изменяется во времени. Некоторые авторы даже вводят дополнительный механизм, запрещающий элементам ГИС (fognodes) выходить из структуры и прекращать вычисления в одностороннем порядке [26].

Предложим показатели свободные от названных недостатков. Будем отталкиваться от того факта, что дестабилизация ГИС является угрозой и работа с ней состоит из трёх этапов: формирование угрозы, распознавание угрозы, устранение угрозы [27].

Интегральный показатель эффективности. Пусть события, состоящие в решении задач, являются независимыми (см. теорему выше). Введём интегральный показатель эффективности P , показывающий, какая часть поставленных задач решена за заданное время T .

$$P = \frac{K}{K^*}, \quad (3)$$

где K^* – количество поставленных перед ГИС задач,
 K – количество решённых ГИС задач.

Согласно определению, производительность Ω – это количество задач K , выполненных за интервал времени Δt :

$$K(\Delta t) = \Omega(\Delta t) \Delta t. \quad (4)$$

Выражение (4) подставим в (3) и устремим $\Delta t \rightarrow 0$. Просуммировав по всем интервалам, получим общий вид показателя:

$$P(t) = \frac{\int_0^t \Omega(z) dz}{\int_0^T \Omega^*(z) dz}, \quad (5)$$

где Ω – текущая производительность,

Ω^* – производительность, необходимая поставленной задаче (требуемая производительность/требуемый ресурс),

T – время, за которое задачи ГИС должны быть решены.

t – текущее время,

Основные свойства интегрального показателя:

1. $P(0)=0$;
2. $P(t) \in [0;1]$, так как $0 \leq K \leq K^*$;
3. $P(t)$ – неубывающая монотонная функция.

Не дожидаясь, пока закончится отведённое для выполнения задач время, через интегральный показатель эффективности видно, насколько ГИС справляется с решением поставленных задач. Для этого достаточно измерить текущую производительность, например, командой *TOP*, и соотнести результаты с развёрнутыми во времени требованиями к производительности, предъявляемыми задачами.

Дифференциальный показатель эффективности ГИС. Текущая производительность ГИС обычно оценивается через загрузку ресурсов в единицу времени, и замеряется за опреде-

лённые временные интервалы Δt_i ($i=1, n$, где n -количество интервалов, прошедших с начала работы ГИС до текущего момента времени t). Интервалы имеют примерно одинаковый размер, поэтому опустим индекс i в обозначении интервала $\Delta t_i = \Delta t$ и в выражении (5) перейдем от интеграла к сумме Римана.

$$P(\Delta t) = \frac{\sum \Omega(\Delta t) \Delta t}{\sum \Omega^*(\Delta t) \Delta t} = \frac{\Delta t \sum \Omega(\Delta t)}{\Delta t \sum \Omega^*(\Delta t)}. \quad (6)$$

Сократив на Δt , получим дифференциальный показатель μ , отражающий «запас производительности», ГИС, то есть ресурс, который может быть выделен решаемой задаче.

$$\mu = \frac{\sum \Omega(\Delta t)}{\sum \Omega^*(\Delta t)}.$$

Когда $\mu < 1$, то в ГИС нехватка производительности, а значит, существует риск не уложиться в заданное время при выполнении поставленных задач.

При $\mu = 1$, ГИС функционирует штатно. Если $\mu > 1$, то ГИС обладает резервом производительности и может взять дополнительные задачи. В примере с UDRS для ω_{Tr}^B без дестабилизации до формирования пула $\mu = 200/200 * 0,5 = 0,5$, что характеризует нехватку производительности и требует создать пул.

Пул, собранный на базе 2 БПЛА из БГ, имеет $\mu = 2 * 200/200 * 0,5 = 1$ – производительности достаточно для решения задач.

Если в пул включить все четыре БПЛА, доступные в БГ, то $\mu = 4 * 200/200 * 0,5 = 2$ – присутствует резерв производительности.

Предложенные показатели с точки зрения теории эффективности обладают особенностями:

- применимы для всех уровней иерархии ГИС: физической и логической структур, уровня программного обеспечения;
- отображают, насколько ГИС пригодна для решения пользовательских задач, в том числе в условиях дестабилизации. Если доступная производительность не меньше требуемой $\Omega \geq \Omega^*$ ($\mu \geq 1$), то ГИС пригодна;
- позволяют оценить, предоставлена ли требуемая производительность в требуемые сроки, а значит, с помощью P и μ оценивается скорость адаптации;
- характеризуют наличие ресурсов («запас прочности»), необходимые для адаптации ГИС.

Отдельно предстоит изучить вопрос о выведении закономерностей, описывающих производительность пулов в зависимости от способов включений элементов, и преобразования одного типа ресурсов в другой. Это позволит обоснованно перераспределять задачи между элементами, назначать задачи ближе к центру ГИС или переносить на границу системы.

Вывод. Предложенная модель ГИС (FIST) описывает предоставление в виде услуги (Fog-as-a-Service) не только вычислительных ресурсов или каналов связи, но и устройств ввода/вывода и накопителей, учитывает влияние дестабилизации на работу ГИС.

Интегральный и дифференциальный показатели эффективности могут использоваться как оптимизируемые показатели в ходе адаптивного управления ГИС в условиях штатного функционирования и дестабилизации.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки России (грант ИБ), проект 08/2020.

Библиографический список:

1. Куделькин В. А. Опыт интеграции распределенных информационных систем / Куделькин В. А., Денисов Ф. В. // ИТ Стандарт, 2017. № 1. С. 24–30.
2. Winchell R. J. Comparing geographic information system-based estimates with trauma center registry data to assess the effects of additional trauma centers on system access / R. J. Winchell, J. Broecker, A. J. Kerwin, B. Eastridge, M. Crandall // Journal of Trauma and Acute Care Surgery, 2020. Vol. 89, Issue 6. pp. 1131–1135. DOI 10.1097/TA.0000000000002943.
3. Столетов О. В. Геоинформационное сопровождение средиземноморской ветви Шелкового пути / О. В. Столетов, И. А. Чихарев, О. А. Москаленко, Д. В. Маковская // ИнтерКарто. ИнтерГИС, 2019. Т. 25, № 1. С. 102–113. DOI 10.35595/2414-9179-2019-1-25-102-113.
4. Burlov V. Development of a model for the management of environmental safety of the region, taking into account of the GIS capacity / V. Burlov, A. Andreev, F. Gomazov // MATEC Web of Conferences, 2018. 02038 p. DOI 10.1051/mateconf/201819302038.
5. Грызунов В. В. Структура живучей сети метеоконплексов транспортно-логистических систем «Индустрии 4.0» / В. В. Грызунов, А. О. Нестерова // Гидрометеорология и экология, 2020. № 59, С. 111–123. DOI 10.33933/2074-2762-2020-59-111-123.
6. IEEE Standard Association et al. IEEE 1934-2018-IEEE standard for adoption of open-fog reference architecture for fog computing, 2018.
7. Panidi E. Fog computing perspectives in connection with the current geospatial stand-ards / E. Panidi // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial In-formation Sciences, 2017. Vol. 42. pp. 171–174.
8. Das J. Spatio-Fog: A green and timeliness-oriented fog computing model for geospatial query resolution / J. Das, A. Mukherjee, S. K. Ghosh, R. Buyya // Simulation Modelling Practice and Theory, 2020. – Vol. 100. – P. 102043.
9. Sun Y. Multi-objective optimization of resource scheduling in fog com-puting using an improved NSGA-II / Y. Sun, F. Lin, H. Xu // Wireless Personal Communications, 2018. Vol. 102. № 2. pp. 1369–1385. – DOI 10.1007/s11277-017-5200-5.
10. Грызунов В. В. Модель целенаправленных агрессивных действий на информационно-вычислительную систему / В. В. Грызунов // Человеческий фактор в сложных технических системах и средах (Эрго-2018) : Труды Третьей международной научно-практической конференции / под ред. А. Н. Анохина [и др.]. 2018. С. 300–305.
11. Хорошевский В. Г. Архитектура вычислительных систем / В. Г. Хорошевский. М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. 520 с.
12. Грызунов В. В. Методика решения измерительных и вычислительных задач в условиях деградации информационно-вычислительной системы / В. В. Грызунов // Вестник СибГУТИ, 2015. № 1. С. 35–44.
13. Калинин В. Н. Теоретические основы системных исследований : краткий авторский курс лекция для адъюнктов академии / В. Н. Калинин. СПб. : ВКА им. А. Ф. Можайского, 2011. – 278 с.
14. Месарович М. Теория многоуровневых иерархических систем / М. Месарович, Д. Мако, И. Такахара. – М. : Мир, 1973. – 344 с.
15. Chekired D. A. Industrial IoT data scheduling based on hierarchical fog computing : A key for enabling smart factory / D. A. Chekired, L. Khoukhi, H. T. Mouftah // IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018. Issue 14, № 10. pp. 4590–4602. DOI 10.1109/TII.2018.2843802.
16. Цыпкин Я. З. Основы теории автоматических систем / Цыпкин Я. З. М. : Наука, 1977. 560 с.
17. Монахов О. Г. Параллельные системы с распределенной памятью : структуры и организация взаимодействий / О. Г. Монахов, Э. А. Монахова. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2000. – 242с.
18. Грызунов В. В. Аналитическая модель целостной информационной системы / В. В. Грызунов // Доклады ТУСУР, 2009. – №1 (19), ч. 1. – С. 226–230.
19. Добронравов В. В. Основы механики неголономных систем / В. В. Добронравов. М. : Высшая школа, 1970. 270 с.
20. Комплекс беспилотной воздушной разведки [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://dfnc.ru/katalog-vooruzhenij/bpla/orlan-10> (дата обращения 20.11.2020).
21. ГОСТ Р 51275-2006. Защита информации. Объект информатизации. Факторы, воздействующие на информацию [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://docs.cntd.ru/document/1200057516> (дата обращения 20.11.2020).
22. Грызунов В.В. Оценивание живучести неоднородных структур // Вестник СибГУТИ. 2011. № 1. С.28-35.
23. Файзуллин Р. В. Методика формирования допустимых вариантов организационного состава и структуры автоматизированной системы управления кибербезопасностью [Электронный ресурс] / Р. В. Файзуллин, Ш. Херинг, К. А. Василенко // Моделирование, оптимизация и информационные технологии, 2020. Т. 8, № 1 (28). – С. 39–40. Режим доступа : https://moit.vivt.ru/wpcontent/uploads/2020/02/FaizullinSoavtors_1_20_1.pdf (дата обращения 27.08.2020). DOI 10.26102/2310-6018/2020.28.1.025.
24. Селифанов В. В. Показатель эффективности управления защитой информации в геоинформационных системах / В. В. Селифанов и др. // Известия Тульского государственного университета. Технические науки, 2018. № 10. С. 176–181.
25. Мельник Э. В. Применение концепции "гуманных" вычислений при проектировании высоконадежных информационно-управляющих систем / Э. В. Мельник, А. Б. Клименко // Известия Тульского государственного университета. Технические науки, 2020. № 2. С. 273–283.
26. Jia B. Double-matching resource allocation strategy in fog computing networks based on cost efficiency / B. Jia et al. // Journal of Communications and Networks, 2018. Iss. 20, № 3. pp. 237–246. DOI 10.1109/JCN.2018.000036.
27. Burlov V. System integration of security maintenance processes in knowledge management / V. Burlov, A. Andreev, F. Gomazov, N. Somga-Bichoga // Proceedings of the European Conference on Knowledge Management, ECKM, 2018. pp. 112–122.

References:

1. Kudelkin V. A. Opyt integratsii raspredelennykh informatsionnykh sistem / V. A. Kudelkin, V. F. Denisov [Experience of integration of distributed information systems] // IT standard, 2017. No. 1. pp. 24–30. (In Russ).
2. Winchell R. J. Comparing geographic information system–based estimates with trauma center registry data to assess the effects of additional trauma centers on system access / R. J. Winchell, J. Broecker, A. J. Kerwin, B. Eastridge, M. Crandall // Journal of Trauma and Acute Care Surgery, 2020. Vol. 89, Issue 6. pp. 1131–1135. DOI 10.1097/TA.0000000000002943.
3. Stoletov O. V. Geoinformatsionnoye soprovozhdeniye sredizemnomorskoy vetvi Shelkovogo puti / O. V. Stoletov, I. A. Chikharev, O. A. Moskalenko, D. V. Makovskaya [Geoinformation support of the mediterranean branch of the silk road] // InterCarto. InterGis. 2019. Part 25, no. 1. pp. 102–113. DOI 10.35595/2414-9179-2019-1-25-102-113 (In Russ).
4. Burlov V. Development of a model for the management of environmental safety of the region, taking into account of the GIS capacity / V. Burlov, A. Andreev, F. Gomazov // MATEC Web of Conferences, 2018. 02038 p. DOI 10.1051/mateconf/201819302038.
5. Gryzunov V. V. Struktura zhivuchey seti meteokompleksov transportno-logisticheskikh sistem «Industrii 4.0» / Gryzunov V. V., Nesterova A. O. [Survivable structure of network of meteorological complexes of transport and logistics systems “industry 4.0”] // Gidrometeorologiya i ekologiya, 2020. No. 59. pp. 111–123. – DOI 10.33933/2074-2762-2020-59-111-123 (In Russ).
6. IEEE Standard Association et al. IEEE 1934-2018-IEEE standard for adoption of open-fog reference architecture for fog computing, 2018.
7. Panidi E. Fog computing perspectives in connection with the current geospatial stand-ards / E. Panidi // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial In-formation Sciences, 2017. Vol. 42. pp. 171–174.
8. Das J. Spatio-Fog: A green and timeliness-oriented fog computing model for geospatial query resolution / J. Das, A. Mukherjee, S. K. Ghosh, R. Buyya // Simulation Modelling Practice and Theory, 2020. Vol. 100. pp. 102043.
9. Sun Y. Multi-objective optimization of resource scheduling in fog com-puting using an improved NSGA-II / Y. Sun, F. Lin, H. Xu // Wireless Personal Communications, 2018. Vol. 102. № 2. pp. 1369–1385. DOI [10.1007/s11277-017-5200-5](https://doi.org/10.1007/s11277-017-5200-5).
10. Gryzunov V. V. Model' tselenapravlennykh agressivnykh deystviy na informatsionno-vychislitel'nyuyu sistemu / V. V. Gryzunov [Model of Purpose Aggressive Actions on the Information–Computing System] // Third International Conference on Human Factors in Complex Technical Systems and Environments (ERGO)s and Environments (ERGO). Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8443814> (accessed by 23.08.2020). DOI 10.1109/ERGO.2018.8443814 (In Russ).
11. Horoshevskij V. G. Arhitektura vychislitel'nykh sistem / V. G. Horoshevskij [Architecture of computing systems]. M. : MGТУ im. N. Je. Bauman Publ., 2008. 520 p. (In Russ).
12. Gryzunov V. V. Metodika resheniya izmeritel'nykh i vychislitel'nykh zadach v usloviyakh degradatsii informatsionno-vychislitel'noy sistemy / V. V. Gryzunov [Problem solving method of measuring and calculating tasks under conditions of data computing system degradation] // Vestnik SibGUTI, 2015. No. 1. pp. 35–44. (In Russ).
13. Kalinin V. N. Teoreticheskie osnovy sistemnykh issledovaniy : kratkij avtorskij kurs lekcija dlja ad`junktov akademii / V. N. Kalinin [Theoretical foundations of system research : a short author's course of lectures for adjuncts of the Academy]. –SPb. : VKA im. A. F. Mozhaevskogo Publ., 2011. 278 p. (In Russ).
14. Mesarovich M. Teoriya mnogourovnevnykh ierarhicheskikh sistem / M. Mesarovich, D. Mako, I. Takahara [Theory of multilevel theoretical systems]. M. : Mir Publ., 1973. 344 p. (In Russ).
15. Chekired D. A. Industrial IoT data scheduling based on hierarchical fog computing : A key for enabling smart factory / D. A. Chekired, L. Khoukhi, H. T. Mouftah // IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018. Issue 14, no. 10. pp. 4590–4602. DOI 10.1109/TII.2018.2843802.
16. Cypkin Ja. Z. Osnovy teorii avtomaticheskikh sistem / Ja. Z. Cypkin [Fundamentals of the theory of automatic systems]. – M. : Nauka Publ., 1977. 560 p. (In Russ).
17. Monahov O. G. Parallelnye sistemy s raspredelennoj pamjat'ju : struktury i organizacija vzaimodejstvij / O. G. Monahov, Je. A. Monahova [Parallel systems with distributed memory : structures : and organization of interactions]. – Novosibirsk : SO RAN Publ., 2000. 242 p. (In Russ).
18. Gryzunov V. V. Analiticheskaya model' tselostnoy informatsionnoy sistemy / V. V. Gryzunov [The analytical model of the whole information system] // Doklady TUSUR, 2009. No. 1 (19), part 1. pp. 226–230. (In Russ).
19. Dobronravov V. V. Osnovy mehaniki negolonomnykh sistem / V. V. Dobronravov [Fundamentals of mechanics of nonholonomic systems]. – M. : Vysshaja shkola Publ., 1970. 270 p. (In Russ).
20. Kompleks bespilotnoj vozduшной razvedki [Elektronnyy resurs] [Unmanned aerial reconnaissance complex [Electronic resource]]. – Available at : <https://dfnc.ru/katalog-vooruzhenij/bpla/orlan-10> (accessed 20.08.2020) (In Russ).
21. GOST R 51275-2006. Zashhita informacii. Ob`ekt informatizacii. Faktory, vozdeystvujushhie na informaciju [Elektronnyy resurs] [GOST R 51275-2006. Information protection. About ect Informatization. Factors affecting information [Electronic resource]]. – Available at : <http://docs.cntd.ru/document/1200057516> (accessed 20.08.2020) (In Russ).
22. Gryzunov V.V. The estimation of the survivability of heterogeneous structure // Vestnik SibGUTI. 2011. № 1. pp.28-35. (In Russ).
23. Fajzullin R. V. Metodika formirovaniya dopustimnykh variantov organizatsionnogo sostava i struktury avtomatizirovannoy sistemy upravleniya kiberbezopasnost'yu [Elektronnyy resurs] / R. V. Fajzullin, Sh. Hering, K. A. Vasilenko [Methodology for the formation of acceptable options for the organizational composition and structure of an automated cybersecurity manage-

- ment system [Electronic resource]] // Modelirovanie, optimizacija i informacionnye tehnologii, 2020. Iss. 8, no. 1 (28). pp. 39–40. Access mode : https://moit.vivt.ru/wpcontent/uploads/2020/02/FaizullinSoavtors_1_20_1.pdf (accessed 27.08.2020). DOI10.26102/2310-6018/2020.28.1.025 (In Russ).
24. Selifanov V. V. Pokazatel' effektivnosti upravleniya zashchitoy informatsii v geoinformatsionnykh sistemakh / V. V. Selifanov et al. [Performance indicator management information protection in geoinformation systems] // Izvestija Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tehnicheskie nauki, 2018. No. 10. pp. 176–181. (In Russ).
 25. Mel'nik Je. V. Primeneniye kontseptsii "tumannykh" vychisleniy pri proyektirovanii vysokonadezhnykh informatsionno-upravlyayushchikh sistem / Je. V. Mel'nik, A. B. Klimenko [A fog-computing concept applying for high-reliable management information system design] // Izvestija Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tehnicheskie nauki, 2020. No. 2. pp. 273–283. (In Russ).
 26. Jia B. Double-matching resource allocation strategy in fog computing networks based on cost efficiency / B. Jia et al. // Journal of Communications and Networks, 2018. Iss. 20, No. 3. pp. 237–246. DOI [10.1109/JCN.2018.000036](https://doi.org/10.1109/JCN.2018.000036).
 27. Burlov V. System integration of security maintenance processes in knowledge management / V. Burlov, A. Andreev, F. Gomazov, N. Somga-Bichoga // Proceedings of the European Conference on Knowledge Management, ECKM, 2018. pp. 112–122.

Сведения об авторе:

Грызунов Виталий Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры информационных технологий и систем безопасности, e-mail.ru: viv1313r@mail.ru, ORCID 0000-0003-4866-217X

Information about the author:

Vitaly V. Gryzunov, Cand. Sci. (Technical), Assoc. Prof., Department of Information Technologies and Security Systems; e-mail.ru: viv1313r@mail.ru, ORCID 0000-0003-4866-217X

Конфликт интересов.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 28.01.2021.

Принята в печать 27.02.2021.

Conflict of interest.

The author declare no conflict of interest.

Received 28.01.2021.

Accepted for publication 27.02.2021.

Для цитирования: А.М. Каднова. Экспериментальная оценка операционных характеристик систем защиты информации. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2021; 48 (1): 90-99. DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-1-90-99

For citation: A.M. Kadnova. Experimental evaluation of the operational characteristics of information protection systems. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2021; 48 (1): 90-99. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-1-90-99

**ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ
COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT**

УДК 621.3

DOI: 10.21822/2073-6185-2021-48-1-90-99

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ОПЕРАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМ
ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ**

А.М. Каднова

*Воронежский институт МВД России,
394065, г. Воронеж, пр-т Патриотов, 53, Россия*

Резюме. Цель. Статья посвящена решению практической проблемы оценки операционного показателя характеристики качества функционирования системы защиты информации (СЗИ) «Удобство использования». **Метод.** Оценка операционных характеристик программных систем может выполняться теоретически и экспериментально. Так как теоретическая оценка операционных характеристик имеет ряд недостатков и ограничений целесообразна экспериментальная оценка. При этом в качестве основного показателя характеристики качества функционирования СЗИ «Удобство использования» целесообразно использовать показатель «Сложность» типовой операции выполняемой администратором безопасности, выражающий среднее время ее выполнения. Экспериментальная оценка операционных характеристик СЗИ осуществлялась с использованием методов отслеживания движения взгляда и мыши. **Результат.** В статье приведена оценка показателя «Сложность» всех типовых операций, выполняемых администратором безопасности при эксплуатации СЗИ «Страж NT 3.0» в соответствии с программной документацией. **Вывод.** Полученные значения показателя «Сложность» могут быть использованы при формировании плана работ по эксплуатации, сопровождению и обслуживанию автоматизированных систем (АС) в защищенном исполнении, в частности, установленной на ней СЗИ, при проведении оценки своевременности выполнения перечисленных работ, а также при обосновании структуры подразделений, ответственных за защиту информации, и их численности.

Ключевые слова: автоматизированная система, система защиты информации, защита информации, операционный показатель, администратор безопасности, пользовательский интерфейс

**EXPERIMENTAL EVALUATION OF THE OPERATIONAL CHARACTERISTICS
OF INFORMATION PROTECTION SYSTEMS**

A.M. Kadnova

*Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia,
53 Patriotov Ave., Voronezh 394065, Russia*

Abstract. Objective. The article is devoted to solving the practical problem of evaluating the operational indicator of the quality characteristics of the information security system usability. **Methods.** Evaluation of the operational characteristics of software systems can be performed theoretically and by measurement. Since the theoretical assessment of operational characteristics has some disadvantages and limitations, an experimental assessment is advisable. Simultaneously, it is advisable to

use the "Complexity" indicator of a typical operation performed by a security administrator, which expresses the average time of its execution as the primary indicator of the quality of the functioning of the information security system usability. Measurement evaluation of the operational characteristics of the information security system was carried out using the eye and mouse movement tracking methods. **Results.** The article provides an assessment of the "Complexity" indicator of all typical operations performed by the security administrator during the Sentinel NT 3.0 ISS operation following the program documentation. **Conclusion.** The obtained values of the "Complexity" indicator can be used in the formation of a work plan for the operation and maintenance of protected automated systems, in particular, with the installed information security system, when evaluating the timeliness of the performance of the listed works, as well as when justifying the structure of the units responsible for information protection and their quantity.

Keywords: automated system, information security system, information security, operational indicator, security administrator, user interface

Введение. Расширение сфер применения информационных технологий привело к широкому распространению СЗИ в АС различного типа. СЗИ используются в связи с реализацией требований по обеспечению безопасности информации, обрабатываемой АС. СЗИ, как правило, представляет собой самостоятельную программную систему, устанавливаемую в состав защищаемой АС на этапе технической реализации [1]. Наличие СЗИ не только решает проблему обеспечения безопасности обрабатываемой информации, но и вызывает негативные последствия. Одним из таких последствий является неизбежное взаимодействие пользователей АС с СЗИ, которое приводит к снижению характеристики качества функционирования СЗИ «Удобство использования».

На основе анализа программной документации СЗИ и нормативно-правовых актов, посвященных требованиям по защите информации, можно выделить следующие категории персонала АС [2-4]:

1. Обычные пользователи;
2. Администратор безопасности.

Обычный пользователь при взаимодействии с СЗИ использует ее функции в прозрачном для себя режиме.

Важнейшая роль при взаимодействии с СЗИ отведена администратору безопасности, отвечающему за установку, настройку и управление функционированием системы защиты [3]. Администратор безопасности является центральной частью подсистемы защиты, существенно влияющей на уровень защиты АС. Учитывая эргатическую составляющую администрирования в процессе функционирования СЗИ, можно обеспечить соответствие настроек СЗИ требованиям политики безопасности и устранить ошибки в работе всех категорий пользователей, а также оценить дальнейшую работу системы защиты с высокой точностью.

Исследование эргатических процессов подразумевает выбор показателей, которые характеризовали бы возможности и способности человека в процессе администрирования СЗИ. Конструирование показателя, который характеризовал бы качество администрирования СЗИ, является сложной научной задачей. Данный показатель должен учитывать не только способности индивидуума, но и статистические данные о поступающих заявках на выполнение стандартных функций администратором безопасности.

Анализ руководящих документов, а также опыт эксплуатации СЗИ, позволяют выделить следующие категории операций, выполняемых в процессе администрирования [3,5-7]:

1. Установка и настройка системы защиты (создание идентификатора администратора безопасности, задание правил аутентификации пользователей, установка меток конфиденциальности, параметров целостности, принципа контроля доступа, назначение грифа и т.д.);
2. Непрерывный контроль за функционированием АС в защищенном исполнении (контроль адекватности и правильности настроек системы защиты, контроль за соблюдением требований по защите информации обычными пользователями, анализ отчетов о работе системы

защиты по журналу регистрации и т.п.);

3. Адекватное реагирование на возникающие в процессе обеспечения безопасности информации инциденты и внештатные ситуации в соответствии с установленной политикой и «Обязанностями администратора безопасности».

Каждая типовая технологическая операция, выполняемая администратором безопасности, характеризуется следующими показателями:

1. Состав – показатель, определяющий порядок действий администратора при взаимодействии с интерфейсом СЗИ в процессе выполнения типовой технологической операции;

2. Время выполнения – комплексный (операционный) показатель, формируемый на основе показателей элементарных действий администратора безопасности и позволяющий провести оценку среднего времени выполнения типовой операции, а также построить временной профиль операции;

3. Частота – показатель, определяющий, какое количество раз администратор безопасности выполнит типовую технологическую операцию. Высокий показатель частоты выполнения типовой технологической операции определяет ее важность.

В данной статье не рассматривается показатель частоты выполнения операций администратором безопасности, так как его оценка уже проводилась в ряде исследований [8,11].

При решении вопросов, связанных с внедрением и эксплуатацией системы защиты в составе АС в защищенном исполнении наиболее важным является определение операционных показателей СЗИ как основы подразделения по защите информации, в том числе документальной базы, регламентирующей планы мероприятий и внутренних проверок по обеспечению безопасности информации [9, 10].

Постановка задачи. Целью исследования является разработка методики экспериментальной оценки операционных характеристик СЗИ и представление результатов их оценки.

Методы исследования. Проведем анализ методов оценки операционного показателя, выражающего среднее время выполнения операции администратором безопасности, назовем его «Сложность».

Теоретический анализ комплексного показателя времени выполнения операции пользователем можно выполнить путем использования законов Хика и Фиттса [12,13].

Закон Хика используется для количественной оценки времени необходимого пользователю на принятие решения, связанного с выбором одного варианта из нескольких (чем больше вариантов, тем больше времени необходимо на выбор). Латентный период интеллектуальной деятельности пользователя при совершении над объектом любого действия из множества возможных вариантов начинается с момента выбора пользователем этого объекта или действия.

В соответствии с законом Хика, при выборе из n вариантов, время на выбор необходимо пропорционально логарифму по основанию 2 от количества вариантов плюс 1. При этом должно выполняться условие равной вероятности всех вариантов.

Закон Хика описывается математическим выражением оценки времени принятия решения следующего вида [12]:

$$T = a + b \log_2(n+1)$$

где

T – общее время реакции;

a и b – константы, которые зависят от задачи и условий и могут быть определены эмпирически;

n – число равновероятных альтернативных вариантов.

Закон Фиттса гласит, что время, необходимое для достижения элемента, прямо пропорционально дистанции до элемента и обратно пропорционально размеру элемента [12]:

$$T = a + b \log_2(D/W + 1)$$

где T – среднее время, затрачиваемое на совершение действия;

a – константа, зависящая от выбора устройства ввода и определяемая эмпирически с по-

мощью регрессионного анализа, интерпретируется как задержка;

b – константа, зависящая от выбора устройства ввода и определяемая эмпирически с помощью регрессионного анализа, описывает ускорение;

W – ширина элемента, измеренная вдоль оси движения устройства ввода;

D – дистанция от точки старта до центра элемента, с учетом того, что конечная точка движения должна находиться в пределах $\pm \frac{W}{2}$ от центра элемента.

Таким образом, общее время выполнения операции пользователем можно подсчитать путем комплексного применения законов Хика и Фиттса.

Действия, описываемые законами, как правило, следуют одно за другим (осуществление выбора из множества возможных и попадание в нужный элемент), а, значит, общее время выполнения операции есть сумма значений двух формул. Данные законы, сформулированные как общие принципы взаимодействия человека и машины, оказались не только чрезвычайно важными для развития первых интерфейсов, но и остаются актуальными по сегодняшний день, обретают новые интерпретации и сферы применения.

Недостатком применения данных аналитических методов является ориентировочный и усредненный характер вычислений. Несмотря на то, что оба закона демонстрируют достаточно высокую степень соответствия практическим данным, закон Хика применим только к простым и быстрым решениям в соответствующем контексте, а закон Фиттса в определенных обстоятельствах неверно воспроизводит время, затрачиваемое на движения некоторыми категориями пользователей [14-16].

Оценка операционных показателей СЗИ может быть проведена экспериментально. Одной из распространённых методик, позволяющих оценить временные показатели пользовательских интерфейсов, является технология Eye-tracking (айтрекинг). Это совершенная технология, которая основана на фиксации движения взгляда пользователя с помощью специального оборудования (стационарного, мобильного или портативного) [17].

Вышеописанная методика может быть реализована путем использования специального устройства Tobii Eye Tracker 4С. Данное устройство позволяет отследить направление взгляда пользователя и зарегистрировать движение головы пользователя, в частности, оценить время фиксации взгляда пользователя на элементах интерфейса СЗИ. Данное устройство носит характер дополнения традиционных устройств управления, таких как мышь, клавиатура, сенсорная панель и т.д.

В основе Tobii Eye Tracker 4С лежит метод регистрации контраста между зрачком и радужной оболочкой, возникающего при инфракрасной подсветке глаз. Основным результатом, получаемым в ходе использования данного устройства, являются тепловая карта, которая может быть проанализирована по окончании выполнения операции.

Анализ тепловой карты позволяет сделать вывод о рациональности и эффективности размещения элементов интерфейса, о том какие элементы подвержены большему вниманию пользователя, а какие – меньше (чем дольше пользователь смотрит на определенный элемент или область, тем более теплым цветом они окрашиваются).

Айтрекинговые исследования являются проверенными и актуальными научными методами с мощной методологической базой и направлены на качественный анализ операционных характеристик СЗИ.

Чтобы получить количественные оценки операционных характеристик СЗИ целесообразно применить метод Mouse-tracking. Mouse-tracking (отслеживание курсора) – технология, основанная на использовании специального программного обеспечения и позволяющая отследить и зафиксировать движение и клики мыши пользователя [18].

Вышеописанная методика может быть реализована путем использования специального инструмента IOGraph V1.0.1. Данное приложение позволяет построить карту передвижения мыши по интерфейсу и кликов пользователя по элементам интерфейса СЗИ [19].

Обсуждение результатов. Для проведения экспериментальной оценки операционных

характеристик СЗИ выбрана одна из наиболее часто используемых систем защиты информации «Страж NT 3.0».

Полный перечень типовых операций выполняемых администратором можно составить на основе анализа программной документации [3] и открытых литературных источников [8-10].

Средства администрирования СЗИ «Страж NT 3.0» предназначены для [6]:

1. Управления носителями информации (добавления и удаления зарегистрированных носителей информации, редактирования свойств для групп носителей, экспорта настроек, редактирования свойств носителей);

2. Управления пользователями (создания пользователей, просмотра паролей и идентификаторов, смены пароля пользователей, просмотра и редактирования свойств пользователей, формирования персональных идентификаторов, чтения и очистки идентификаторов);

3. Работы с файлами (редактирования разрешений, изменения владельца, редактирования параметров аудита, назначения грифа, установки режима запуска, редактирования параметров аудита, установки целостности, выполнения проверки целостности);

4. Контроля устройств (редактирования свойств группы устройств, экспорта настроек);

5. Работы с принтерами (редактирования разрешений или смены владельцев, назначения грифа);

6. Работы с журналами событий (работы с группами событий, работы с фильтрами событий, открытия и сохранения журнала событий);

7. Тестирования защиты;

8. Блокировки компьютера;

9. Разблокировки компьютера.

На примере типовой операции «Создание пользователя» с использованием программы «Менеджер пользователей» СЗИ «Страж NT 3.0» рассмотрим подробно состав типовой технологической операции администратора безопасности и экспериментальную оценку его операционного показателя «Сложность».

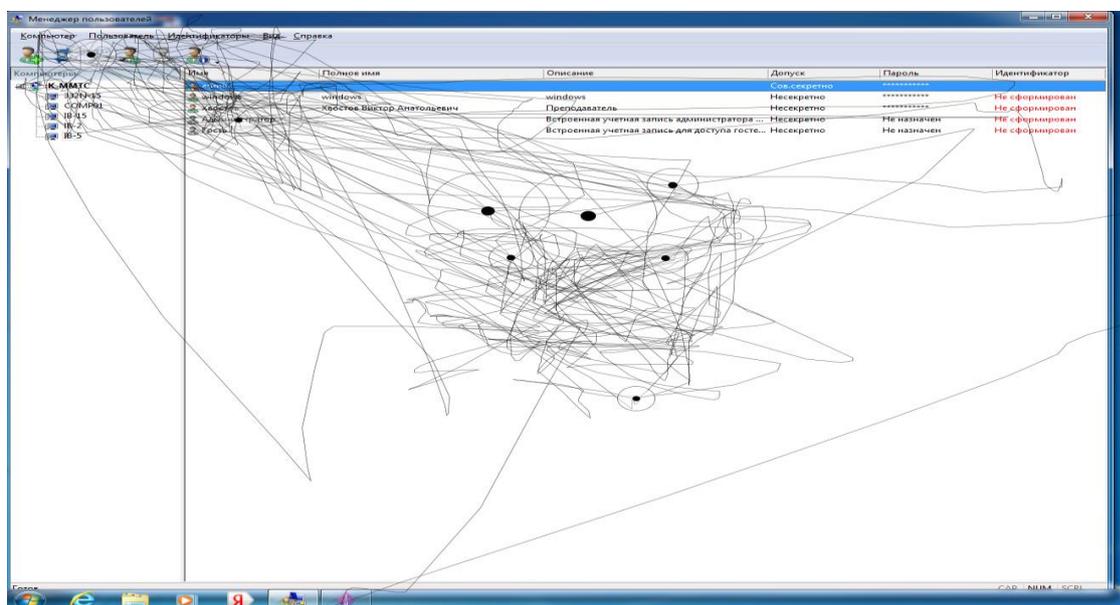


Рис. 1. Интерфейс программы «Менеджера пользователей» СЗИ «Страж NT 3.0» при выполнении типовой операции «Создание пользователя», запись движения курсора и его фиксации на элементах интерфейса, записанная с использованием IOGraph V1.0.1

Fig. 1. Interface of the «User Manager» program of the SZI «Guardian NT 3.0» when performing a typical operation «Create a user», recording the cursor movement and fixing it on the interface elements, recorded using IOGraph V1.0.1

Для создания пользователя в СЗИ «Страж NT 3.0» необходимо запустить программу «Менеджер пользователей», выбрать пункт меню «Компьютер», затем – «Новый пользова-

тель». На экране появится диалоговое окно «Новый пользователь», в котором необходимо ввести полное имя, имя пользователя, описание, пароль и допуск. Далее необходимо нажать кнопку «Создать» [3].

Траектория перемещения курсора и время фиксации его на элементе интерфейса «Менеджера пользователей» СЗИ «Страж NT 3.0», записанная с использованием IOGraph V1.0.1, представлена на рис. 1.

Тепловая карта фиксации взгляда администратора безопасности на элементах интерфейса программы «Менеджер пользователей» СЗИ «Страж NT 3.0», записанная с использованием Tobii Eye Tracker 4С, представлена на рис. 2.

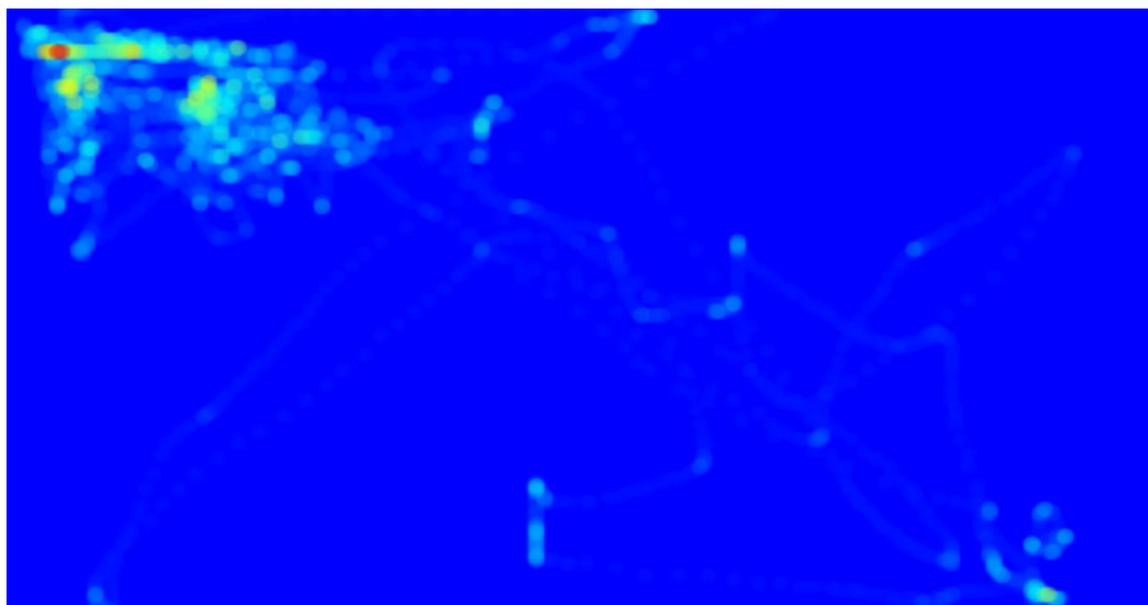


Рис. 2. Тепловая карта фиксации взгляда администратора безопасности на элементах интерфейса программы «Менеджер пользователей» СЗИ «Страж NT 3.0» при выполнении типовой операции «Создание пользователя», записанная с использованием Tobii eye tracker 4С

Fig. 2. Heat map of fixing the security administrator's gaze on the interface elements of the «User Manager» program of the «Guardian NT 3.0» information security facility when performing a typical operation «Create a user», recorded using Tobii eye tracker 4С

Анализ записи перемещения курсора показал, что среднее время выполнения операции по созданию пользователя в СЗИ «Страж NT 3.0» составляет порядка 60 с.

При этом в ходе реализации типовой операции администратором безопасности зафиксированы 6 остановок курсора на элементах диалогового окна длительностью по 5 с и две остановки по 15 с. Таким образом, показатель «Сложность» операции «Создание пользователя» СЗИ «Страж NT 3.0» оставляет величину порядка 60 с.

Тепловая карта фиксации внимания администратора безопасности системы показывает, что при создании пользователя основное внимание было направлено на элементы «Компьютеры» и «Имя пользователя» интерфейса программы «Менеджер пользователей».

Экспериментальная оценка осуществлялась в ходе выполнения лабораторных работ по изучению механизмов защиты, реализованных в СЗИ «Страж NT 3.0». Лабораторные работы выполняли студенты 5 курса при изучении дисциплины «Информационная безопасность организации». Количество студентов – 83.

В результате экспериментальной оценки операционных характеристик СЗИ «Страж NT 3.0» были получены значения, представленные в табл. 1.

**Таблица 1. Результаты экспериментальной оценки операционных характеристик
 СЗИ «Страж NT 3.0»**
**Table 1. Results of an experimental assessment of the operational characteristics
 of the SZI «Guard NT 3.0»**

№ п.п.	Наименование типовой операции выполняемой администратором Name of a typical operation performed by the administrator	Значение показателя «Сложность» The value of the «Difficulty» indicator
1.	Добавление зарегистрированных носителей информации Adding registered media	60 с
2.	Редактирование свойств для групп носителей Editing Properties for Media Groups	75 с
3.	Редактирование свойств носителей Editing media properties	104 с
4.	Экспорт настроек Export settings	55 с
5.	Создание пользователей Create users	60 с
6.	Просмотр пароля и списка идентификаторов пользователя View password and list of user IDs	35 с
7.	Просмотр и редактирование свойств пользователя Viewing and Editing User Properties	60 с
8.	Смена пароля пользователя Change user password	65 с
9.	Формирование персональных идентификаторов Formation of personal identifiers	55 с
10.	Чтение и очистка идентификаторов Reading and clearing identifiers	45 с
11.	Редактирование разрешений Editing Permissions	120 с
12.	Редактирование параметров системного аудита Editing system audit parameters	40 с
13.	Изменение владельца Change of ownership	35 с
14.	Назначение грифа Neck purpose	35 с
15.	Редактирование параметров дополнительного аудита Editing Additional Auditing Options	50 с
16.	Установка режима запуска и допуска Setting the trigger mode and tolerance	45 с
17.	Установка параметров целостности Setting integrity parameters	45 с
18.	Редактирование разрешений Editing Permissions	120 с
19.	Назначение грифа Neck purpose	75 с
20.	Редактирование свойств для групп устройств Editing properties for device groups	110 с
21.	Экспорт настроек Export settings	50 с
22.	Открытие и сохранение журнала событий Opening and saving the event log	35 с
23.	Работа с фильтром событий Working with an event filter	300 с
24.	Задание группы событий Setting a group of events	290 с
25.	Тестирование системы защиты Testing the protection system	50 с
26.	Блокировка компьютера Locking your computer	30 с
27.	Разблокировка компьютера Unlocking your computer	30 с
28.	Повторная идентификация пользователя Re-identifying a user	100 с

Вывод. Применение специального программно-аппаратного обеспечения, реализующего технологии Eye-tracking и Mouse-tracking, позволяет экспериментально оценить показатель качества функционирования СЗИ «Удобство использования» – «Сложность», который характеризует среднее время выполнения типовых операций администратором безопасности.

В ходе экспериментальной оценки типовых операций, выполняемых администратором безопасности СЗИ «Страж NT 3.0», определенных в «Руководстве администратора» [3], получены операционные характеристики всех типовых операций, выполняемых администратором этой системы.

Анализ значений показателя «Сложность» типовых операций, представленных в табли-

це, показал, что значения показателя определяются количеством элементов интерфейса программы. Наибольшей сложностью, закономерно, характеризуются операции редактирования разрешений для доступа к файловым ресурсам, редактирования разрешений на доступ к принтерам и устройствам, а также работа с фильтром событий и с группами событий.

Малыми значениями показателя «Сложность» характеризуются операции блокировки и разблокировки компьютера.

Полученные значения показателя «Сложность» могут быть использованы при формировании плана работ по эксплуатации, сопровождению и обслуживанию АС в защищенном исполнении, в частности, установленной на ней СЗИ, при проведении оценки своевременности выполнения перечисленных работ, а также при обосновании структуры подразделений, ответственных за защиту информации, и их численности.

Библиографический список:

1. Каднова А.М. Алгоритм создания автоматизированных систем в защищенном исполнении / А.М. Каднова, О.Ю. Макаров, С.А. Мишин, Е.А. Рогозин // Безопасность информационных технологий. 2019. Т. 26. № 4. С. 93–100.
2. Об утверждении требований к обеспечению защиты информации в автоматизированных системах управления производственными и технологическими процессами на критически важных объектах, потенциально опасных объектах, а также объектах, представляющих повышенную опасность для жизни и здоровья людей и для окружающей природной среды : приказ от 14 марта 2014 г. № 31 [Электронный ресурс]. – URL : <https://fstec.ru/index?id=868:prikaz-fstek-rossii-ot-14-marta-2014-g-n-31>
3. Система защиты информации «Страж NT». Руководство администратора [Электронный ресурс]. – URL : http://www.guardnt.ru/download/doc/admin_guide_nt_3_0.pdf.
4. Система защиты информации «Страж NT». Руководство пользователя [Электронный ресурс]. – URL : http://www.guardnt.ru/download/doc/admin_guide_nt_3_0.pdf.
5. Довгуля М.М. Оповещение администратора информационной безопасности о нарушениях в работе корпоративной сети / М.М. Довгуля, Р.В. Мещеряков // Научная сессия ТУСУР. 2005 : сб. науч. тр. Томск, 2005. С. 96–97.
6. Яремчук С. Защитник сети / С. Яремчук // Системный администратор. 2003. № 11(12). С. 56–60.
7. Бормотов С.В. Системное администрирование на 100%: монография/С.В. Бормотов. Санкт-Петербург : Питер, 2006. 256 с.
8. Хвостов В.А. Методы и средства повышения защищенности автоматизированных систем : монография / В.А. Хвостов [и др.]. Воронеж: Воронежский институт МВД России, 2013. 108 с.
9. Каднова А.М. Способ оценки операционных характеристик систем защиты информации от несанкционированного доступа на основе / А.М. Каднова, О.И. Бокова, Е.А. Рогозин, Н.С. Хохлов, О.Ю. Макаров // Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики : сб. науч. тр. Воронеж, 2020. С. 656–659.
10. Каднова А.М. К вопросу о решении научной задачи количественной оценки эрготехнических характеристик систем защиты информации от несанкционированного доступа в автоматизированных системах ОВД / А.М. Каднова, Е.А. Рогозин // Общественная безопасность, законность и правопорядок в III тысячелетии. 2019. № 5–2. С. 307–310.
11. Скрыпников А.В. Нормирование требований к характеристикам программных систем защиты информации / А.В. Скрыпников, В.А. Хвостов, Е.В. Чернышова, В.В. Самцов, М.А. Абасов // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2018. Т. 80. № 4(78). С. 96–110.
12. Королев Д.А. Эргономика и юзабилити пользовательского интерфейса программного обеспечения : методическое пособие / Д.А. Королев. Москва: Московский государственный институт электроники и математики (технический университет), 2004. 214 с.
13. Попов А.А. Эргономика пользовательских интерфейсов в информационных системах : учебное пособие /А.А. Попова [и др.]. Москва: Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова, 2012. 21 с.
14. Soukoreff R.W. Towards a standard for pointing device evaluation, perspectives on 27 years of Fitts' law research / R.W. Soukoreff I.S. MacKenzie // Int. J. of Human-Computer Stud. 2004. Vol. 61(6). pp. 751–789.
15. Gump A. Application of Fitts' law to individuals with cerebral palsy / A. Gump, M. LeGare, D.L. Hunt // Perceptual and motor skills. 2002. Vol. 94(1). pp. 884–895.
16. Amazeen E.L. The effects of attention and handedness on coordination dynamics in a bimanual Fitts' law task / E.L. Amazeen, S.D. Ringenbach, P.G. Amazeen // Exper. brain research. 2005. Vol. 164(4). P. 484–499.
17. Спириин И.А. Исследование и применение eye-tracking технологии на человеке / И.А. Спириин // Молодой ученый. 2016. №2. С. 227–230.

18. Каднова А.М. Методический подход к оценке вероятностного показателя своевременности выполнения типовых операций администратором системы защиты информации автоматизированной системы / А.М. Каднова // Вестник Дагестанского государственного технического университета. 2019. Т. 46. № 3. С. 87–96.
19. IOGraph [Электронный ресурс]. URL : <https://iographica.com>.

References:

1. Kadnova A.M. Algoritm sozdaniya avtomatizirovannykh sistem v zashchishchenom ispolnenii / A.M. Kadnova, O.YU. Makarov, S.A. Mishin, Ye.A. Rogozin // Bezopasnost' informatsionnykh tekhnologiy. 2019. T. 26. № 4. S. 93–100. [Kadnova A.M. Algorithm for the creation of automated systems in a secure execution / A.M. Kadnova, O.Yu. Makarov, S.A. Mishin, E.A. Rogozin // Security of information technology. 2019. Vol. 26. No. 4. pp. 93–100.
2. Ob utverzhdenii trebovaniy k obespecheniyu zashchity informatsii v avtomatizirovannykh sistemakh upravleniya proizvodstvennymi i tekhnologicheskimi protsessami na kriticheski vazhnykh ob'yektakh, potentsial'no opasnykh ob'yektakh, a takzhe ob'yektakh, predstavlyayushchikh povyshennuyu opasnost' dlya zhizni i zdorov'ya lyudey i dlya okruzhayushchey prirodnoy sredy : prikaz ot 14 marta 2014 g. № 31 [Elektronnyy resurs]. URL : <https://fstec.ru/index?id=868:prikaz-fstek-rossii-ot-14-marta-2014-g-n-31> [On approval of requirements for information protection in automated control systems for production and technological processes at critical facilities, potentially hazardous facilities, as well as facilities that pose an increased danger to human life and health and the environment: order of March 14, 2014 No. 31 [Electronic resource]. URL: <https://fstec.ru/index?id=868:prikaz-fstek-rossii-ot-14-marta-2014-g-n-31>
3. Sistema zashchity informatsii «Strazh NT». Rukovodstvo administratora [Elektronnyy resurs]. – URL : http://www.guardnt.ru/download/doc/admin_guide_nt_3_0.pdf. [Information security system «Guard NT». Administrator Guide [Electronic resource]. URL: http://www.guardnt.ru/download/doc/admin_guide_nt_3_0.pdf.
4. Sistema zashchity informatsii «Strazh NT». Rukovodstvo pol'zovatelya [Elektronnyy resurs]. – URL : http://www.guardnt.ru/download/doc/admin_guide_nt_3_0.pdf. [The information security system «Guard NT». User Guide [Electronic resource]. URL: http://www.guardnt.ru/download/doc/admin_guide_nt_3_0.pdf.
5. Dovgulya M.M. Opoveshcheniye administratora informatsionnoy bezopasnosti o narusheniyakh v rabote korporativnoy seti / M.M. Dovgulya, R.V. Meshcheryakov // Nauchnaya sessiya TUSUR. 2005 : sb. nauch. tr. Tomsk, 2005. S. 96–97. [Dovgulya M.M. Alert of the information security administrator about violations in the work of the corporate network / M.M. Dovgul, R.V. Meshcheryakov // Scientific session TUSUR – 2005: Sat. Scientific tr. Tomsk, 2005. pp. 96–97.
6. Yaremchuk S. Zashchitnik seti / S. Yaremchuk // Sistemnyy administrator. 2003. № 11(12). S. 56–60. [Yaremchuk S. Defender of the network / S. Yaremchuk // System Administrator. 2003. No. 11 (12). pp. 56–60.
7. Bormotov S.V. Sistemnoye administrirovaniye na 100% : monografiya / S.V. Bormotov. Sankt-Peterburg : Piter, 2006. 256 s. [Bormotov S.V. 100% system administration: monograph / S.V. Bormotov. St. Petersburg: Peter, 2006. 256 p.
8. Khvostov V.A. Metody i sredstva povysheniya zashchishchennosti avtomatizirovannykh sistem : monografiya / V.A. Khvostov [i dr.]. Voronezh: Voronezhskiy institut MVD Rossii, 2013. 108 s. [Khvostov V.A. Methods and means of increasing the security of automated systems: monograph / V.A. Tails [et al.]. – Voronezh: Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia, 2013. 108 p.
9. Kadnova A.M. Sposob otsenki operatsionnykh kharakteristik sistem zashchity informatsii ot nesantsionirovannogo dostupa na osnove / A.M. Kadnova, O.I. Bokova, Ye.A. Rogozin, N.S. Khokhlov, O.YU. Makarov // Aktual'nyye problemy prikladnoy matematiki, informatiki i mekhaniki : sb. nauch. tr. Voronezh, 2020. S. 656–659. [Kadnova A.M. A method for assessing the operational characteristics of information security systems against unauthorized access based on / A.M. Kadnova, O.I. Bokova, E.A. Rogozin, N.S. Khokhlov, O.Yu. Makarov // Actual problems of applied mathematics, computer science and mechanics: collection of articles. Scientific tr. Voronezh, 2020. pp. 656–659.
10. Kadnova A.M. K voprosu o reshenii nauchnoy zadachi kolichestvennoy otsenki ergatotekhnicheskikh kharakteristik sistem zashchity informatsii ot nesantsionirovannogo dostupa v avtomatizirovannykh sistemakh OVD / A.M. Kadnova, Ye.A. Rogozin // Obschestvennaya bezopasnost', zakonnost' i pravoporyadok v III tysyacheletii. 2019. № 5–2. S. 307–310. [Kadnova A.M. On the issue of solving the scientific problem of quantifying the ergatotechnical characteristics of information protection systems against unauthorized access in automated ATS systems / A.M. Kadnova, E.A. Rogozin // Public safety, law and order in the III millennium. 2019. No. 5–2. pp. 307–310.
11. Skrypnikov A.V. Normirovaniye trebovaniy k kharakteristikam programmykh sistem zashchity informatsii / A.V. Skrypnikov, V.A. Khvostov, Ye.V. Chernyshova, V.V. Samtsov, M.A. Abasov // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernykh tekhnologiy. 2018. T. 80. № 4(78). S. 96–110. [Skrypnikov A.V. Rationing requirements for the characteristics of software information protection systems / A.V. Skrypnikov, V.A. Khvostov, E.V. Chernyshova, V.V. Samtsov, M.A. Abasov // Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technologies. 2018. Vol. 80. No. 4 (78). pp. 96–110.
12. Korolev D.A. Ergonomika i yuzabiliti pol'zovatel'skogo interfeysa programmnoy obespecheniya :

- metodicheskoye posobiye / D.A. Korolev. Moskva : Moskovskiy gosudarstvennyy institut elektroniki i matematiki (tehnicheskiiy universitet), 2004. 214 s. [Korolev D.A. Ergonomics and usability of the software user interface: methodological manual / D.A. Korolev. Moscow: Moscow State Institute of Electronics and Mathematics (Technical University), 2004. 214 p.
13. Popov A.A. Ergonomika pol'zovatel'skikh interfeysov v informatsionnykh sistemakh : uchebnoye posobiye /A.A. Popova [i dr.]. Moskva: Rossiyskiy ekonomicheskiiy universitet im. G.V. Plekhanova, 2012. 21 s. [Popov A.A. Ergonomics of user interfaces in information systems: a training manual / A.A. Popova [et al.]. Moscow: Russian University of Economics G.V. Plekhanova, 2012. 21 p.
 14. Soukoreff R.W. Towards a standard for pointing device evaluation, perspectives on 27 years of Fitts' law research / R.W. Soukoreff I.S. MacKenzie // Int. J. of Human-Computer Stud. 2004. Vol. 61 (6). pp. 751-789.
 15. Gump A. Application of Fitts' law to individuals with cerebral palsy / A. Gump, M. LeGare, D.L. Hunt // Perceptual and motor skills. 2002. Vol. 94 (1). pp. 884-895.
 16. Amazeen E.L. The effects of attention and handedness on coordination dynamics in a bimanual Fitts' law task / E.L. Amazeen, S.D. Ringenbach, P.G. Amazeen // Exper. brain research. 2005. Vol. 164 (4). R. 484-499.
 17. Spirin I.A. Issledovaniye i primeneniye eye-tracking tehnologii na cheloveke / I.A. Spirin // Molodoy uchenyy. 2016. №2. S. 227-230 [Spirin I.A. Research and application of eye-tracking technology in humans / I.A. Spirin // Young scientist. 2016. No. 2. S. 227-230.
 18. Kadnova A.M. Metodicheskiiy podkhod k otsenke veroyatnostnogo pokazatelya svoeyvremennosti vypolneniya tipovykh operatsiy administratorom sistemy zashchity informatsii avtomatizirovannoy sistemy /A.M. Kadnova // Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2019. T. 46. № 3. S. 87-96. IOGraph [Elektronnyy resurs]. URL : [https:// iographica.com](https://iographica.com). [Kadnova A.M. Methodological approach to assessing the probability indicator of the timeliness of typical operations by the administrator of the information protection system of the automated system / A.M. Kadnova // Herald of the Daghestan State Technical University. 2019. Vol. 46. No. 3. pp. 87-96.
 19. IOGraph [Electronic resource]. URL: [https:// iographic.com](https://iographic.com).

Сведения об авторе:

Каднова Айжана Михайловна, старший преподаватель, аспирант, кафедра информационной безопасности, e-mail: aizhana_kadnova@mail.ru

Information about the author:

Aizhana M. Kadnova, Senior Lecturer, Postgraduate Student, Department of Information Security, e-mail: aizhana_kadnova@mail.ru

Конфликт интересов.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 24.12.2020.

Принята в печать 01.02.2021.

Conflict of interest.

The author declare no conflict of interest.

Received 24.12.2020.

Accepted for publication 01.02.2021.

Для цитирования: А.С. Лосев. Бутстреп методы исследований зонального разрушения массива горных пород вокруг подземных выработок. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2021; 48(1): 100-107. DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-1-100-107

For citation: A.S. Losev. Bootstrap methods for investigating the rock mass zonal fracture around underground workings. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2021; 48 (1): 100-107. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-1-100-107

**ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ
COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT**

УДК 622:510.67

DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-1-100-107

**БУТСТРЕП МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ЗОНАЛЬНОГО РАЗРУШЕНИЯ МАССИВА
ГОРНЫХ ПОРОД ВОКРУГ ПОДЗЕМНЫХ ВЫРАБОТОК**

А.С. Лосев

Институт прикладной математики Дальневосточного отделения Российской академии наук,

690041, г. Владивосток, ул. Радио, 7, Россия

Резюме: Цель. Исследование проблем зональной дезинтеграции горных пород вокруг глубоких подземных выработок в условиях предельно малой выборки, возникающих в геомеханических явлениях и процессах в массивах горных пород при добыче полезных ископаемых. **Метод.** В качестве основного инструмента используются методы численного ресамплинга, а именно рандомизация, бутстреп и методы Монте-Карло, которые позволяют нарастить объем выборки, по имеющимся натурным данным, до необходимого размера для проведения статистически обоснованного анализа. **Результат.** Решена задача зональной дезинтеграции горных пород вокруг глубоких подземных выработок, для которой получена оценка аналитической зависимости параметра периодичности функции дефектности от предела прочности породы. Основным показателем статистической значимости построенной модели в работе выбран коэффициент детерминации, на основе которого выбирается вид исследуемой аналитической зависимости. Его отклонение в итоговой модели не превышает 0,5% при любом объеме бутстреп выборки, в то время как в остальных моделях, рассмотренных в работе, данное значение достигается при $n > 200$. **Вывод.** Полученные интервальные оценки с помощью бутстреп методов, имеют существенное преимущество по сравнению с традиционными подходами, позволяя повысить достоверность результата в условиях предельно маленьких выборок данных без потери уровня значимости.

Ключевые слова: бутстреп методы, алгоритм, зональное разрушение массива, интервальные оценки параметров

**BOOTSTRAP METHODS FOR INVESTIGATING THE ROCK MASS ZONAL FRACTURE
AROUND UNDERGROUND WORKINGS**

A.S. Losev

*Institute for Applied Mathematics, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences,
7 Radio St., Vladivostok 690041, Russia*

Abstract: Objective. Investigation of the problems of zonal disintegration of rocks around deep underground workings in extremely small sampling, arising in geomechanical phenomena and processes in rock mass during mining. **Methods.** The primary tool used is numerical resampling methods, namely randomization, bootstrap, and Monte Carlo methods, which allow increasing the sample size, according to the available field data, to the required size for conducting a statistically sound analysis. **Results.** The problem of zonal fracture of rocks around deep underground workings is solved, for which the analytical dependence of the periodicity parameter of the defect function on the rock

strength limit is estimated. The primary indicator of the statistical significance of the constructed model in work is the determination factor, based on which the type of analytical dependence under study is selected. Its deviation in the final model does not exceed 0.5% for any bootstrap sample volume, while in the other models considered in this paper, this value is achieved at $n > 200$. **Conclusion.** The obtained interval estimates using bootstrap methods have a significant advantage over traditional approaches, increasing the reliability of the result in extremely small data samples without losing the level of significance.

Keywords: bootstrap methods, algorithm, rock mass zonal fracture, interval parameter estimates

Введение. Увеличение мирового объема добычи полезных ископаемых и глубины разработки их месторождений, определяет значимость исследований различных геомеханических явлений и процессов в массивах горных пород. Особенно важным является вопрос безопасности, который напрямую зависит от характера зональных разрушений (дезинтеграции) горных пород вокруг глубоких подземных выработок.

Естественным образом исследования и разработки в данной области в основном направлены на решение проблем повышения устойчивости подземных горных выработок в условиях больших глубин и определения значений параметров модели, характеризующей процесс, влияющих на эффект зональной дезинтеграции. К таким исследованиям относятся задачи построения моделей, характеризующих различные геомеханические явления и процессы в массивах горных пород, востребованные в процессе добычи полезных ископаемых [1-7]. В центре внимания находятся задачи зональной дезинтеграции горных пород вокруг глубоких подземных выработок [8-13].

Наравне с этим помимо разработки соответствующих моделей, адекватно описывающих геомеханические явления и процессы в массивах горных пород и позволяющих проводить прогнозные расчеты зональной структуры разрушения, необходимо наличие натуральных данных, количество которых по объективным причинам не велико. В частности, в работах [14-15], методами статистического анализа, проводится оценка значимости различных видов аналитической зависимости задачи зональной дезинтеграции горных пород вокруг глубоких подземных выработок, а в условиях предельно малого объема выборки вопрос качества результата является актуальным.

В качестве возможного решения, в работе [16] нами использовались методы численного ресамплинга, к которому относится рандомизация, бутстреп и методы Монте-Карло [17]. Их основная идея состоит в многократной обработке случайно составленных выборок по экспериментальным данным, рассмотрении их под различными углами и сопоставлении полученных результатов. В результате для задачи зональной дезинтеграции горных пород вокруг глубоких подземных выработок, получена оценка значимости аналитической зависимости параметра периодичности функции дефектности от положения зон разрушения. Естественным предложением, является построение аналитической зависимости параметра периодичности функции дефектности от предела прочности породы и определяется оценка её статистической значимости.

Постановка задачи. Обратимся к задаче, рассмотренной в работах [15-16, 18], о распределении поля напряжений вокруг выработки круглого сечения, которая рассматривается как плоская и стационарная, в условиях несжимаемости и гидростатичности нагружения на бесконечности:

$$\frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r} + \frac{1}{r} (\sigma_{rr} - \sigma_{\varphi\varphi}) = 0.$$

Бигармоническое уравнение для функции дефектности определено как

$$\Delta^2 R - \gamma^2 R = 0,$$

и граничные условия

$$R|_{r=r_0} = 0, \quad \left. \frac{\partial R}{\partial r} \right|_{r=r_0} = 0, \quad \lim_{r \rightarrow \infty} R(r) = 0,$$

где σ_{rr} - нормальное радиальное напряжение, $\sigma_{\varphi\varphi}$ - нормальное тангенциальное напряжение, Δ - оператор Лапласа, γ - параметр периодичности модели.

Решение для расстояния от центра выработки до точки массива, определено в виде:

$$R(r) = aJ_0(\sqrt{\gamma r}) + bN_0(\sqrt{\gamma r}) + cK_0(\sqrt{\gamma r}),$$

где J_0, N_0, K_0 - функции Бесселя, Неймана и Макдональда нулевого порядка.

В работах [15, 19], по данной задаче, получены и статистически обоснованы две модели зависимости параметра периодичности модели - γ от положения середины первой зоны разрушения - r линейного вида:

$$\gamma = f_1(r) = -10r + 23,$$

и нелинейного вида:

$$\gamma = f_2(r) = 50,381 \exp(-1,3669 r).$$

Также исследованы модели зависимости положения середины первой зоны разрушения - r от предела прочности породы на одноосное сжатие - σ линейного вида:

$$r = g_1(\sigma) = 0,008\sigma + 0,757,$$

и нелинейного вида:

$$r = g_2(\sigma) = 0,8133 \exp(0,0061 \sigma).$$

Исходя из вышеизложенного, интерес вызывает зависимость параметра периодичности от предела прочности породы, выраженная в соответствующей суперпозиций. Анализ всевозможных композиций ранее исследованных моделей, позволит выделить наиболее эффективную и устойчивую моделей с позиции рассматриваемых предельных условий.

Полученные ранее результаты, основаны на предельно маленьких выборках натуральных данных, что обосновывает выбор метода дальнейшей работы.

Методы исследования. Выбор наиболее оптимальной и статистически обоснованной модели проведем на основе сравнительного анализа доверительных интервалов коэффициента детерминации - \tilde{R}^* , построение которых проведем традиционными методами (1) и бутстреп методами.

$$\left(\sqrt{\tilde{R}^*} - t_\alpha \sqrt{\frac{1 - \tilde{R}^*}{n - 2}} \right)^2 \leq \tilde{R}^* \leq \left(\sqrt{\tilde{R}^*} + t_\alpha \sqrt{\frac{1 - \tilde{R}^*}{n - 2}} \right)^2, \quad (1)$$

где t_α - табличное значение t -критерием Стьюдента при заданном уровне значимости [20].

Наравне с этим проследим изменение дисперсии, как величины характеризующей отклонение наблюдаемой величины от её математического ожидания, по каждой из рассматриваемых моделей бутстреп методами. Поиск доверительного интервала коэффициента детерминации и дисперсии произведем с помощью модификации соответствующего алгоритма, построенного в работе [16], разработанного на основе алгоритма построения бутстреп интервалов [21]. Исходные данные по месторождениям представим в виде множества пар $Z = \{z_i | z_i = (\sigma_i, \gamma_i)\}, i = 1, \dots, 4$. Тогда алгоритм построения бутстреп интервала коэффициента детерминации и дисперсии соответственно примет вид:

Шаг 1. Генератором случайных чисел построим бутстреповскую выборку, объемом n элементов, вытягивая на каждом шаге элементы из множества Z с повторением, случайным образом, и формируя из них выборку вида:

$$\{z_1^*, z_2^*, \dots, z_n^*\}_1 \text{ где } z_j^* \in Z, j = 1, \dots, n.$$

Шаг 2. Рассчитаем для полученной выборки бутстреповскую оценку коэффициента детерминации \tilde{R}_1^* и дисперсии S_1^2 по соответствующим формулам:

$$\tilde{R}_1^* = 1 - \frac{Q_e}{Q}, \quad S_1^2 = \frac{Q_e}{n-2},$$

где Q_e – сумма квадратов остатков регрессии, Q – сумма квадратов разностей γ_i и их среднеарифметического значения [20].

Шаг 3. Повторим предыдущие шаги B -раз, сформировав в результате набор коэффициента детерминации $\tilde{R}_1^*, \tilde{R}_2^*, \dots, \tilde{R}_B^*$ и дисперсии $S_1^2, S_2^2, \dots, S_B^2$.

Шаг 4. Отсортируем полученные наборы в порядке возрастания.

Шаг 5. Определим соответствующие доверительные интервалы бутстреп распределения с уровнем значимости α по следующим формулам:

$$\tilde{R}_{B \cdot \frac{\alpha}{2}}^* \leq \tilde{R}^*(n, \alpha) \leq \tilde{R}_{B \cdot (1 - \frac{\alpha}{2})}^*, \quad S_{B \cdot \frac{\alpha}{2}}^2 \leq S^2(n, \alpha) \leq S_{B \cdot (1 - \frac{\alpha}{2})}^2$$

В силу специфики метода, особое внимание необходимо уделить числу бутстреп реализаций, которые обратно пропорционально размерности бутстреп выборки [22]. Ранее в работах [15, 19] показано, что для исследования рассматриваемых моделей необходимый объем бутстреп выборок не менее 100, при соответствующем числе реализаций не менее 10000.

Обсуждение результатов. Используя модификацию алгоритма построения бутстреп интервалов, построим бутстреп интервалы коэффициентов детерминации и дисперсии рассматриваемых моделей с числом бутстреп реализаций $B = 10^5$ и при различном объеме выборки равной от 100 до 200, с уровнем значимости $\alpha=0,1$.

Графическое представление построенных бутстреп интервалов (рис. 1) позволяет установить, что скорость сходимости бутстреп интервалов прямо пропорциональна n .

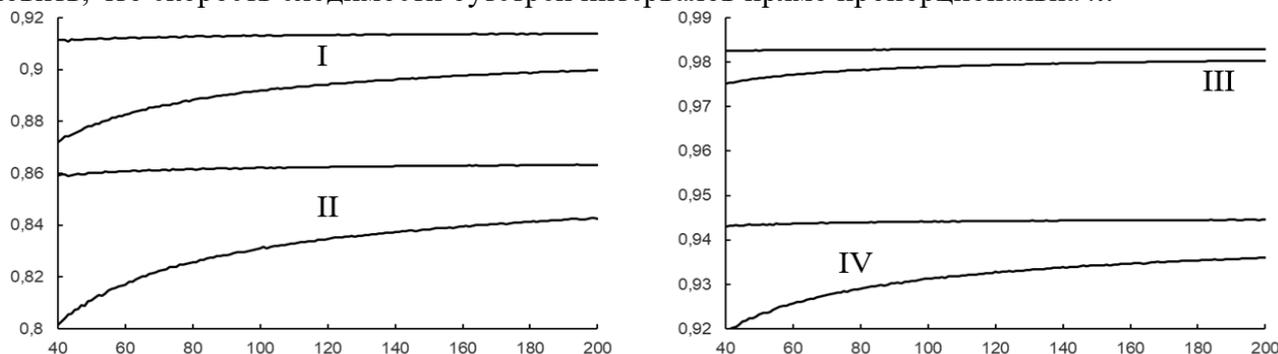


Рис. 1. Бутстреп интервалы коэффициента детерминации в зависимости от размерности бутстреп выборки при $\alpha=0,1$ (I – модель 1, II – модель 2, III – модель 3, IV – модель 4)

Fig. 1. Bootstrap intervals of the determination coefficient depending on the dimension of the bootstrap sample at $\alpha=0,1$ (I - model 1, II - model 2, III - model 3, IV - model 4)

Модель № 3 демонстрирует наибольшее значение коэффициента детерминации по сравнению с остальными при всех рассмотренных значениях n .

Наравне с этим именно эта модель обладает наибольшей скоростью сходимости бутстреп интервала и при $n=200$ длина интервала не превышает 0,003, в то время, как в остальных моделях его длина в моделях № 1, 2, 4 составляет 0,014; 0,02; 0,008 соответственно.

Оценка длины бутстреп интервала дисперсии (рис.2) подтверждает приоритетность модели № 3, отражая существенно низкую величину отклонения параметра периодичности модели от значения его среднего значения. А именно, по сравнению с другими моделями, она меньше в 5; 7,31; 4 раз соответственно. Однако, необходимо отметить, что в случае оценки

дисперсии размерность бутстреп интервала обратно пропорциональна n , поэтому уместным является оценка скорости её роста. В данном случае, аппроксимация оценки длины бутстреп интервала дисперсии на квадратный трехчлен в каждом случае, подтверждает минимальную крутизну соответствующей ветки, характеризующей её рост в модели № 3.

Полученные результаты соответствующей аппроксимации статистически обоснованы с помощью критерия Фишера с высоким коэффициентом корреляции и соответствующем уровнем значимости.

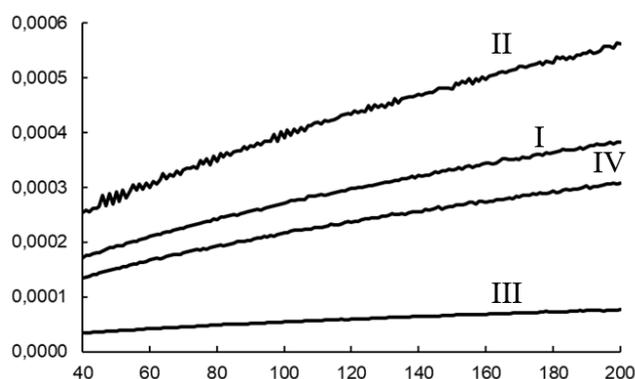


Рис. 2. Длина бутстреп интервала дисперсии в зависимости от размерности бутстреп выборки при $\alpha=0,1$ (I – модель 1, II – модель 2, III – модель 3, IV – модель 4)

Fig. 2. The length of the bootstrap variance interval depending on the dimension of the bootstrap sample at $\alpha=0,1$ (I - model 1, II - model 2, III - model 3, IV - model 4)

Дальнейший сравнительный анализ доверительных интервалов (табл. 1), полученных традиционным способом по формуле (1) и бутстреп интервалов также подтверждает более быструю сходимость в модели № 3 по сравнению с остальными моделями, как при начальных $n=50$, так и при $n=200$.

Таблица 1. Сравнительная таблица доверительных и бутстреп интервалов
 Table 1. Comparative table of confidence and bootstrap intervals

№ модели Model No.	Доверительный интервал Confidence interval	n	Бутстреп интервал Bootstrap intervals	Отношение длин интервалов Interval length ratio
1. $\gamma = f_1(g_1(\sigma))$	[0,618; 1]	100	[0,892; 0,913]	18,2
		150	[0,897; 0,914]	22,5
		200	[0,900; 0,914]	27,3
2. $\gamma = f_1(g_2(\sigma))$	[0,503; 1]	100	[0,831; 0,862]	16,0
		150	[0,838; 0,863]	19,9
		200	[0,843; 0,863]	24,8
3. $\gamma = f_2(g_1(\sigma))$	[0,841; 1]	100	[0,979; 0,983]	39,8
		150	[0,980; 0,983]	53,0
		200	[0,980; 0,983]	53,0
4. $\gamma = f_2(g_2(\sigma))$	[0,700; 1]	100	[0,931; 0,944]	23,1
		150	[0,934; 0,944]	30,0
		200	[0,936; 0,944]	37,5

Наравне с полученными результатами, анализ данных из табл. 1 выраженных в процентном соотношении бутстреп полуинтервала от его середины (рис. 3), подтверждает, что модель № 3, является наиболее адекватной и отклонение её коэффициента детерминации не превышает 0,5% при начальных рассматриваемых n .

В целом ранжирование моделей по степени отклонения усредненной оценки коэффициента детерминации от границ бутстреп интервала в зависимости от размерности бутстреп выборки полностью коррелирует с ранжированием, основанным на длине бутстреп интервала

дисперсии (рис. 2).

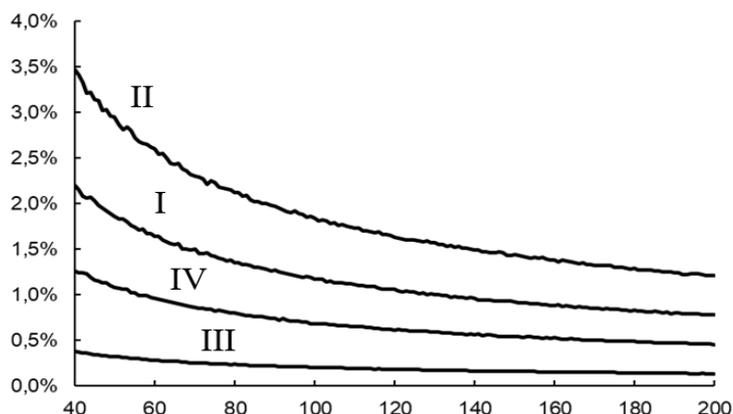


Рис. 3. Отклонение усредненной оценки коэффициента детерминации от границ бутстреп интервала в зависимости от размерности бутстреп выборки (I – модель 1, II – модель 2, III – модель 3, IV – модель 4)

Fig. 3. Deviation of the average estimate of the determination coefficient from the boundaries of the bootstrap interval depending on the dimension of the bootstrap sample (I - model 1, II - model 2, III - model 3, IV - model 4)

Таким образом, получено, что из перечня рассмотренных моделей, полученных путем суперпозиции ранее известных результатов, наиболее статистически значимой и обоснованной моделью зависимости параметра периодичности от предела прочности породы является:

$$\gamma = f_2(g_1(\sigma)) = 50,381 \exp(-1,3669(0,008\sigma + 0,757)).$$

Вывод. Полученные интервальные оценки с помощью бутстреп методов, имеют существенное преимущество по сравнению с традиционными подходами.

Одно из наиболее значимых это прямая зависимость их качества от числа бутстреп реализаций и объема бутстреп выборки, что существенно позволяет повысить достоверность результата в условиях предельно маленьких выборок данных до необходимого уровня значимости.

В традиционных статистических методах данного эффекта достигают либо за счет понижения статистической значимости при уменьшении размерности доверительного интервала, что в общем случае не всегда позволяет получить необходимые нижнюю и верхнюю оценки пределов, либо по средствам увеличения исходной выборки, что требует сбора дополнительных данных, который не всегда возможен, особенно при оценках различных характеристик в исследовании геомеханических явлений и процессов в массивах горных пород.

Библиографический список:

1. Chen X.G., Zhang Q.Y. Mechanism analysis of phenomenon of zonal disintegration in deep tunnel model test under high geostress // *Rock and Soil Mechanics*. 2011. Vol.32. No. 1. pp. 84–90.
2. Qian Q.H., Zhou X.P. Non-Euclidean continuum model of the zonal disintegration of surrounding rocks around a deep circular tunnel in a non-hydrostatic pressure state // *Journal of Mining Science*. 2011. No. 47(1). pp. 37–46. doi:10.1134/S1062739147010059
3. Qian Q.H., Zhou X.P. Quantitative analysis of rockburst for surrounding rocks and zonal disintegration mechanism in deep tunnels // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. p 2011. p № 3(1). pp. 1–9. doi:10.3724/SP.J.1235.2011.00001
4. Tan Y.L., Ning J.G., Li H.T. In situ explorations on zonal disintegration of roof strata in deep coal mines // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. p 2012. Vol. 49. No 1. pp.113–124.
5. Zhou X.P., Shou Y.D. Excavation induced zonal disintegration of the surrounding rock around a deep circular tunnel considering unloading effect // *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*. 2013. – № 64. pp. 246–257. doi:10.1016/j.ijrmms.2013.08.010
6. Wang X., Pan Y., Zhang Z.. A Spatial Strain Localization Mechanism of Zonal Disintegration through Numerical Simulation // *Journal of Mining Science*. p2013. Vol. 49. № 3. pp. 357–367
7. Zhou X.P., Song H.F., Qian Q.H. The effects of three-dimensional penny-shaped cracks of zonal disintegration of the surrounding rock masses around a deep circular tunnel // *Acta Mechanica Solida Sinica*. – 2015. Vol. 28. No. 6. pp.722-734

8. Одинцев В.Н. Отрывное разрушение массива скальных горных пород. – М.: ИПКОН РАН, 1996. – 166 с.
9. Макаров П.В. Об иерархической природе деформации и разрушения твердых тел и сред // Физ. мезомех. 2004. Т. 7. № 4. С. 25-34.
10. Гузев М.А., Макаров В.В. Деформирование и разрушение сильно сжатых горных пород вокруг выработок. Владивосток : Дальнаука, 2007. 232 с.
11. Зональная дезинтеграция горных пород и устойчивость подземных выработок/ [В.Н. Опарин и др.]; отв. Ред. М.А. Гузев; Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Ин-т горного дела. –Новосибирск: Изд-во СО РАН. 2008. 278 с.
12. Ксендзенко Л.С., Макаров В.В., Опанасюк Н.А., Голосов А.М. Закономерности деформирования и разрушения сильно сжатых горных пород и массивов: монография / Инженерная школа ДВФУ. Владивосток: Дальневост. федер. ун-т. 2014. 192 с.
13. Chen J.G., Zhou T.T., Zhang Y.X. Shock failure mechanism of zonal disintegration within surrounding rock in deep chamber // *Rock and Soil Mechanics*. 2011. № 32(9). pp. 2629-2634.
14. Лосев А.С. Зависимость зоны разрушения массива вокруг горной выработки от предела прочности породы // *Горные науки и технологии*. 2017. № 2 с. 43-49.
15. Лосев А.С. Статистическая оценка параметра периодичности модели зональной дезинтеграции горных пород // *Бюллетень науки и практики. Электрон. журн*. 2017. № 7(20). с. 78-82.
16. Лосев А.С. Бутстреп методы построения доверительных интервалов оценки параметров модели зональной дезинтеграции горных пород вокруг подземной выработки // *Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки*. 2017. № 44(4) с. 114-121. DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-4-114-121
17. Эфрон Б. Нетрадиционные методы многомерного статистического анализа: Сб. статей: Пер. с англ./ Предисловие Ю. П. Адлера, Ю. А. Кошевича. М.: Финансы и статистика, 1988.
18. Гузев М.А., Парошин А.А. Неевклидова модель зональной дезинтеграции горных пород вокруг подземной выработки // *Прикладная механика и техническая физика*. 2001. Т. 42 № 1 с. 147–156.
19. Ксендзенко Л.С. Разработка метода определения параметров зональной структуры разрушения сильно сжатого массива вокруг подземных выработок // *Вестник Дальневосточного государственного технического университета*. 2011. № 3/4(8/9). с. 144–166.
20. Айвазян С.А., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. *Прикладная статистика. Исследование зависимостей*. Финансы и статистика, 1985 – 487 с.
21. Ануфриев Д.В. Бутстреп-методы построения доверительных интервалов для задач оценивания точностных характеристик системы ЛА-КСЦПНО // *Научный вестник МГТУ ГА*. 2005. № 89. с. 93-96.
22. Глухов В.В., Ануфриев Д.В. Бутстреп-процедуры определения точностных характеристик// *Научный вестник МГТУ ГА*. 2005. № 89. с. 30-35.

References:

1. Chen X.G., Zhang Q.Y. Mechanism analysis of phenomenon of zonal disintegration in deep tunnel model test under high geostress. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, vol.32, no. 1, pp. 84–90.
2. Qian Q.H., Zhou X.P. Non-Euclidean continuum model of the zonal disintegration of surrounding rocks around a deep circular tunnel in a non-hydrostatic pressure state. *Journal of Mining Science*, 2011, no. 47(1), pp. 37–46.
3. Qian Q.H., Zhou X.P. Quantitative analysis of rockburst for surrounding rocks and zonal disintegration mechanism in deep tunnels. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2011, no. 3(1), pp. 1–9.
4. Tan Y.L., Ning J.G., Li H.T. In situ explorations on zonal disintegration of roof strata in deep coal mines. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2012, vol. 49, no. 1, pp.113–124.
5. Zhou X.P., Shou Y.D. Excavation induced zonal disintegration of the surrounding rock around a deep circular tunnel considering unloading effect. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2013, no. 64, pp. 246–257.
6. Wang X., Pan Y., Zhang Z.. A Spatial Strain Localization Mechanism of Zonal Disintegration through Numerical Simulation. *Journal of Mining Science*, 2013, vol. 49, no. 3, pp. 357–367
7. Zhou X.P., Song H.F., Qian Q.H. The effects of three-dimensional penny-shaped cracks of zonal disintegration of the surrounding rock masses around a deep circular tunnel. *Acta Mechanica Solida Sinica*, 2015, vol. 28, no. 6, pp.722-734.
8. Odincev V.N. Otryvnoe razrushenie massiva skal'nyh gornyh porod. [Detachable destruction of an array of rocky rocks]. М.: ИПКОН РАН, 1996. 166 p. (In Russ)]
9. Makarov P.V. Ob ierarhicheskoy prirode deformacii i razrusheniya tverdyh tel i sred. [On the hierarchical nature of deformation and destruction of solids and media] *Fiz. mezomekh*, 2004, Vol. 7, no. 4, pp. 25-34.
10. Guzev M.A., Makarov V.V. Deformirovanie i razrushenie sil'no szhatyh gornyh porod vokrug vyrabotok.[Deformation and destruction of highly compressed rocks around the excavations] *Vladivostok : Dal'nauka*, 2007. 232 p. (In Russ)]
11. Zonal'naya dezintegraciya gornyh porod i ustojchivost' podzemnyh vyrabotok. [Zonal disintegration of rocks and stability of underground workings] / [V.N. Oparin i dr.]; отв. Ред. М.А. Гузев; Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Ин-т горного дела. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008, 278 p. (In Russ)]
12. Ksendzenko L.S., Makarov V.V., Opanasyuk N.A., Golosov A.M. Zakonomernosti deformirovaniya i

razrusheniya sil'no szhatyh gornyh porod i massivov: monografiya. [Regularities of deformation and destruction of highly compressed rocks and massifs: monograph] Inzhenernaya shkola DVFU. Vladivostok: Dal'nevost. feder. un-t, 2014, 192 p. (In Russ)]

13. Chen J.G., Zhou T.T., Zhang Y.X. Shock failure mechanism of zonal disintegration within surrounding rock in deep chamber. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, no. 32(9), pp. 2629-2634.

14. Losev A.S. Zavisimost' zony razrusheniya massiva vokrug gornoj vyrabotki ot predela prochnosti porody. [Dependence of the zone of destruction of the massif around the mine workings from the ultimate strength of the rock] *Gornye nauki i tekhnologii*, 2017, no. 2, pp. 43-49. (In Russ)]

15. Losev A.S. Statisticheskaya ocenka parametra periodichnosti modeli zonal'noj dezintegracii gornyh porod. [Statistical estimation of the periodicity parameter of the model of the zone disintegration of rocks] *Byulleten' nauki i praktiki*, 2017, no.7 (20), pp. 78-82. (In Russ)]

16. Losev A.S. Butstrep metody postroeniya doveritel'nyh intervalov ocenki parametrov modeli zonal'noj dezintegracii gornyh porod vokrug podzemnoj vyrabotki. *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. 2017, N. 44(4), s. 114-121. [Bootstrapping methods for constructing confidence intervals for the estimation of model parameters of the zonal disintegration of rocks around underground excavations]// *Herald of the Daghestan State Technical University*. 2017, No. 44(4), pp. 114-121 (In Russ)]

17. Ehfron B. Netradicionnye metody mnogomernogo statisticheskogo analiza. [Non-traditional methods of multivariate statistical analysis]. M.: *Finansy i statistika*, 1988. (In Russ)]

18. Guzev M.A., Paroshin A.A. Neevklidova model' zonal'noy dezintegratsii gornyh porod vokrug podzemnoj vyrabotki. [UnEuclidean model of zonal disintegration of mountain breeds round the underground making] *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika*, 2001, vol. 42, no. 1. pp. 147–156. (In Russ)]

19. Ksendzenko L.S. Razrabotka metoda opredeleniya parametrov zonal'noy struktury razrusheniya sil'no szhatogo massiva vokrug podzemnyh vyrabotok. [Development of method of determination of parameters of zonal structure of destruction of the strongly compressed array round the underground making.] *Vestnik Dal'nevostochnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2011, no. 3/4(8/9), pp.144–166. (In Russ)]

20. Ajvazyan S.A., Enyukov I.S., Meshalkin L.D. *Prikladnaya statistika. Issledovanie zavisimostej* [Applied statistics. Dependency study]. *Finansy i statistika*, 1985. 487 p. (In Russ)]

21. Anufriev D.V. Butstrep-metody postroeniya doveritel'nyh intervalov dlya zadach ocenivaniya tochnostnyh harakteristik sistemy LA-KSCPNO [Bootstrap methods for constructing confidence intervals for estimation problems of the accuracy characteristics of the LA-KSNPNO system]. *Nauchnyj vestnik MGTU GA*, 2005, no. 89, pp. 93-96. (In Russ)]

22. Gluhov V.V., Anufriev D.V. Butstrep-procedury opredeleniya tochnostnyh harakteristik [Bootstrap procedures for determining the accuracy characteristics]. *Nauchnyj vestnik MGTU GA*, 2005, no. 89, pp. 30-35. (In Russ)]

Сведения об авторе:

Лосев Александр Сергеевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, научная группа вероятностных методов и системного анализа; e-mail: A.S.Losev@yandex.ru

Information about the author:

Alexander S. Losev, Cand. Sci. (Physical and Mathematical), Senior Researcher, Scientific group of Probabilistic methods and Systems analysis; e-mail: A.S.Losev@yandex.ru

Конфликт интересов.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 14.01.2021.

Принята в печать 16.02.2021.

Conflict of interest.

The author declare no conflict of interest.

Received 14.01.2021.

Accepted for publication 16.02.2021.

Для цитирования: В.Б. Мелехин, М.В. Хачумов. Об одном подходе решения задачи коммивояжера для планирования автономным беспилотным летательным аппаратом маршрутов облета целей. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2021; 48(1): 108-118. DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-1-108-118

For citation: V.B. Melekhin, M.V. Khachumov. On one approach to solving the traveling salesman problem for autonomous unmanned aerial vehicle planning of target flight paths. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2021; 48 (1): 108-118. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-1-108-118

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ
COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT
УДК 62.506.29.519
DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-1-108-118

**ОБ ОДНОМ ПОДХОДЕ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ КОММИВОЯЖЕРА ДЛЯ ПЛАНИРОВАНИЯ
АВТОНОМНЫМ БЕСПИЛОТНЫМ ЛЕТАТЕЛЬНЫМ АППАРАТОМ МАРШРУТОВ
ОБЛЕТА ЦЕЛЕЙ**

¹Мелехин В.Б., ^{2,3}Хачумов М.В.

¹Дагестанский государственный технический университет,
¹367026, г. Махачкала, пр. Имама Шамиля, 70, Россия,

²Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук,

²119333, Москва, ул. Вавилова, д.44, кор.2, Россия,

³Российский университет дружбы народов (РУДН),

³117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6, Россия

Резюме. Цель. Разработать принцип построения инструментальных средств и процедур оптимальной маршрутизации облета целей автономным беспилотным летательным аппаратом, обладающих приемлемой для реализации на бортовой ЭВМ сложностью. **Методы.** Сформулированы правила оптимизации карты местности с расположенными на ней целями, создание матрицы штрафов, позволяющей учитывать в процессе планирования возмущающие факторы нестабильной воздушной среды, и построение опорного дерева поиска минимального по принятой стоимости маршрута облета целей. **Результаты.** Предложен принцип, позволяющий разработать эффективные процедуры планирования минимальных по принятой стоимости маршрутов облета целей в нестабильной воздушной среде. В основу планирования поведения закладывается оптимизация формального описания заданной карты местности, приводящая к существенному сокращению количества сравниваемых между собой альтернатив в процессе поиска минимального маршрута облета целей. Это, в свою очередь, обеспечивает возможность реализации процедур планирования на бортовой вычислительной системе автономного беспилотного летательного аппарата. Доказано утверждение, позволяющее обосновать наличие минимального по принятой стоимости маршрута облета целей в формальном описании карты местности, полученном в результате преобразования исходного ее представления на основе разработанных правил оптимизации. **Вывод.** Рассмотренный подход позволяет эффективным образом решать различного вида задачи, сводящиеся к задаче о коммивояжере, в том числе планировать и минимальный маршрут облета целей автономным беспилотным летательным аппаратом в нестабильной воздушной среде в условиях неопределенности.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ, проекты: 18-07-00025 а и 17-29-070003 офу _м

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, проблемная среда, карта местности, возмущающие факторы, облет целей, оптимальный маршрут

ON ONE APPROACH TO SOLVING THE TRAVELING SALESMAN PROBLEM FOR AUTONOMOUS UNMANNED AERIAL VEHICLE PLANNING OF TARGET FLIGHT PATHS

¹V. B. Melekhin, ^{2,3}M.V. Khachumov

¹ Daghestan State Technical University,

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

² Federal Research Center «Informatics and Management» of the Russian Academy of Sciences,

² 44 Vavilova St., building 2, Moscow 119333, Russia,

³ Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University),

⁴ 6 Miklukho-Maklaya St., Moscow 117198, Russia

Abstract. Objective. Develop a principle of constructing tools and procedures for optimal routing of targets by an autonomous uncrewed aerial vehicle, which have an acceptable complexity for implementation on an onboard computer. **Methods.** The rules for optimizing the terrain map with the located targets, creating a penalty matrix that considers the disturbing factors of the unstable air environment in the planning process, and building a reference tree for finding the minimum route for the accepted cost of flying around the targets. **Results.** A principle is proposed to develop effective procedures for planning minimum cost-effective routes to fly around targets in an unstable air environment. The basis for behavior planning is the optimization of the formal description of a given terrain map, which leads to a significant reduction in the number of alternatives compared in the process of searching for a minimum route to fly around targets. This, in turn, makes it possible to implement planning procedures on the onboard computer system of an autonomous uncrewed aerial vehicle. A statement is proved to justify the existence of a minimum route for the accepted cost of overflying targets in the formal description of the terrain map obtained as a result of converting its original representation based on the developed optimization rules. **Conclusion.** The considered approach effectively solves various types of issues reduced to the traveling salesman problem, including planning the minimum route of flying around targets by an autonomous uncrewed aerial vehicle in an unstable air environment under uncertainty conditions.

Acknowledgments. The work was partially supported by the RFBR, projects: 18-07-00025 a and 17-29-070003 ofi_m

Keywords: uncrewed aerial vehicle, problem environment, terrain map, disturbing factors, target overflight, optimal route

Введение. К одной из сложных задач, решаемых автономным (не управляемым диспетчером с земли) беспилотным летательным аппаратом (АБЛА), следует отнести маршрутизацию облета расположенных на земле целей с оптимальными затратами, имеющихся у него полетных ресурсов в нестабильной воздушной среде (ВС) [1, 2].

Это обусловлено тем, что планирование АБЛА оптимального маршрута облета целей сводится к решению задачи коммивояжера, которое в общем случае имеет экспоненциальную сложность [3,4]. Следует отметить, что в настоящее время разработано большое количество различных методов решения задачи коммивояжера. Например, ее можно решить на основе эвристических алгоритмов с применением метода ветвей и границ [5,6], с привлечением интеллектуальных инструментальных средств [7], генетических [8,9] и роевых алгоритмов [10, 11]. Нашли широкое применение также алгоритмы, опирающиеся на методы целочисленного линейного [12] и динамического программирования [13], алгоритмы поиска, связанные с построением циклического покрытия графа, определяющего формальное описание карты местности с расположенными на ней целями [14] и т.д.

Однако, не смотря на разнообразие методов решения задачи коммивояжера, все они, в конечном итоге, базируются на применении эвристических инструментов, обеспечивающих сокращение перебора в процессе поиска оптимального маршрута облета целей.

В результате такие алгоритмы, хотя и приводят к сокращению числа сравниваемых между собой альтернатив в процессе поиска, но решение задачи коммивояжера на их основе

все еще остается достаточно трудоемким. В результате, практическое применение данных и аналогичных им методов [15, 16] для планирования поведением АБЛА ограничено необходимостью создания для их реализации поддерживающих подсистем на базе аппаратуры наземного базирования, так как бортовые ЭВМ автономных беспилотных летательных аппаратов имеют ограниченные вычислительные ресурсы.

Таким образом, возникает необходимость в разработке процедур планирования маршрута облета целей в нестабильной ВС, которые обладают сложностью, позволяющей их эффективную реализацию на бортовой ЭВМ системы автоматического управления АБЛА.

Постановка задачи. В настоящей работе для решения данной проблемы предлагаются процедуры планирования, основанные на применении эвристических правил, служащих не для сокращения перебора в процесса поиска, а для оптимизации заданной в формальном виде карты местности с обозначенными на ней координатами расположенных на земле целей. Построенные на такой основе процедуры планирования маршрута облета целей в нестабильной ВС позволяют существенным образом обойти отмеченные выше проблемы, связанные с высокой сложностью решения задачи коммивояжера.

Методы исследования. Построение и оптимизация формальной модели карты местности в процессе поиска оптимального маршрута облета целей.

К одному из подходов повышения эффективности методов поиска оптимального маршрута облета целей можно отнести формальное представление и допустимую оптимизацию модели карты, отражающей местоположение целей на территории облетаемого участка местности.

Другими словами, необходимо чтобы карта местности, с одной стороны, обеспечивала возможность выбора оптимального по сложности маршрута облета целей в реальном времени, а с другой стороны, позволяла бы сократить в процессе поиска количество просматриваемых альтернативных вариантов решаемой задачи.

В общем случае формальным образом карту местности с расположенными на ней целями удобно представить в виде неориентированного полного графа $G_1 = (V_1, E_1)$ без петель (рис.1) построенного в заданной системе координат.

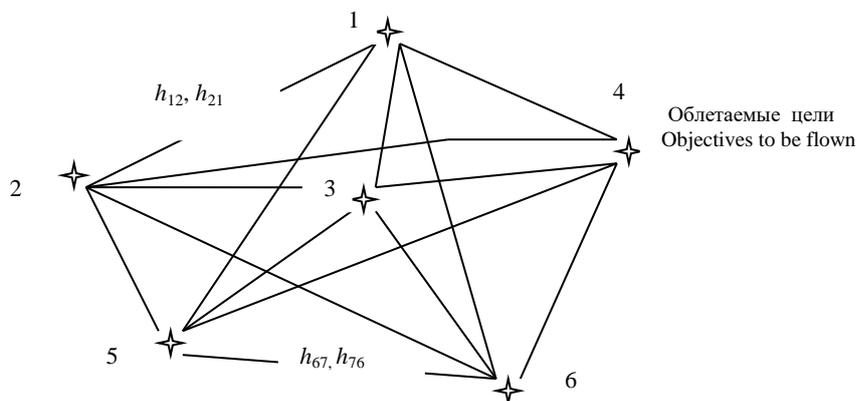


Рис.1. Исходно заданная формальная модель карты местности с расположенными на ней целями
Fig.1. Initially specified formal terrain map model with targets located on it

Здесь $V_1 = \{v_i\}, i = 1, 2, \dots, 7$ – множество вершин, помеченных координатами положения целей на местности, а $E_1 = \{e_j(i, i^*)\}, j = 1, 2, \dots, 21$ – множество ребер определяемых штрафами

$h_{k,j}$, связанными с преодолением расстояний между инцидентными по карте местности целями, точками отлета и прибытия АБЛА с учетом действующих в нестабильной ВС возмущений.

Штрафы $h_{k,j}$ перелета от k местоположения АБЛА к j цели или от k к j цели зависят от расстояния между соответствующими точками, расположенными на местности и различных возмущающих факторов нестабильной ВС, влияющих на скорость полета летательного аппарата над соответствующими участками наземной среды.

При этом к основным возмущающим факторам ВС, влияющим на величину штрафов, следует отнести направление, скорость и угол под которым ветер воздействует на АБЛА в воздушном пространстве [17].

Необходимо отметить, что штрафы $h_{k,j}$, которыми помечаются ребра $e_j(i, i^*) \in E$ графа G_1 , определяются АБЛА в реальном времени путем решения навигационного треугольника скоростей [18] и построенной на этой основе и экспертных данных лингвистической функции [19], зависящая лингвистическая переменная которой, определяется степенью влияния возмущающих факторов ВС на полет АБЛА по выбранному маршруту облета целей.

Роль независимых лингвистических переменных данной функции выполняют направление и средняя скорость полета АБЛА, скорость и направления ветра, принятые относительно заданной системы координат после выполнения соответствующих замеров информационной измерительной системой АБЛА в нестабильной ВС.

На основе полученной таким образом формальной модели карты местности, например, приведенной на рис. 1, формируется таблица штрафов M_1 (табл.1), представляющая собой матрицу смежности вершин графа G_1 , элементы которой определяются штрафами $h_{k,j}$ перелета АБЛА из точки k в точку j , которые вычисляются по построенной лингвистической функции.

Таблица 1. Вид матрицы штрафов M_1 перелета АБЛА от одной цели к другой построенной на основе модели местности приведенной на рис. 1

Table 1. Matrix of penalties for ABLA flight from one target to another based on the terrain model shown in Fig. 1

	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5	v_6
v_1	0	h_{21}	h_{31}	h_{141}	h_{51}	h_{61}
v_2	h_{12}	0	h_{32}	h_{42}	h_{52}	h_{62}
v_3	h_{13}	h_{23}	0	h_{43}	h_{53}	h_{63}
v_4	h_{14}	h_{24}	h_{34}	0	h_{54}	h_{64}
v_5	h_{15}	h_{25}	h_{35}	h_{45}	0	h_{65}
v_6	h_{16}	h_{26}	h_{36}	h_{46}	h_{56}	0

Учитывая, что точки подлета и отлета АБЛА от заданного участка местности, могут меняться во времени (например, для АБЛА палубного базирования), то после их определения в структуре графа G_1 , проводится его оптимизация, т.е. строится частичный граф G_1^* исходного графа.

Для этого из графа G_1 удаляется основная часть ребер, которые не входят в оптимальный маршрут облета целей, на основе следующих эвристических правил его преобразования.

1. Все ребра в графе G_1 заменяются парами разнонаправленных дуг. В результате получается ориентированный мульти граф G_1^* .

2. Вершины $v_0, v_k \in G_1^*$, которые, соответственно, дополнительно помечаются координатами точек подлета и отлета АБЛА от заданного участка местности связываются дугами со всеми остальными вершинами формируемого ориентированного графа G_1^* . При этом ориента-

ция дуг должна быть направлена от точки полета к вершинам, которые помечены целями, а дуги, связывающие цели с точкой отлета, ориентированы в сторону последней.

Остальные дуги такого вида, связывающие между собой точку подлета и отлета АБЛА к заданному участку местности, из мультиграфа G_1^* удаляются.

В результате точки подлета и отлета становятся непосредственно не связанными между собой в преобразуемой модели карты местности.

3. В ориентированном мульти графе G_1^* , каждая вершина помеченная целью, должна оставаться смежной, т.е. связанной исходящими из нее дугами только с двумя другими смежными с ней вершинами, помеченными целями, которые достигаются из нее с минимальными штрафами. Для этого все остальные дуги между смежными целями в мультиграфе G_1^* удаляются.

4. Частичный граф, определяющий смежные между собой цели, не включающий точки отлета и прибытия АБЛА, после проведение указанных выше преобразований должен оставаться связанным. Если данное условие не выполняется, то в него добавляется дуга, позволяющая обеспечить данное условие, которая имеет минимальную стоимость в графе $G_2 = G_1 \setminus G_1^*$, где G_2 – дополнение графа G_1 до графа G_1^* .

Рассмотрим в качестве примера случай, когда первая и шестая вершины исходного графа G_1 (рис. 1), соответственно определяют заданные точки отлета и подлета АБЛА к заданному участку местности, а матрица штрафов M_2 перелета АБЛА от одной цели к другой для исходной карты местности определяется данными приведенными в табл. 2.

Таблица 2. Матрица штрафов M_1 перелета АБЛА от одной цели к другой для исходной модели карты местности
Table 2. Matrix of penalties for ABLA flight from one target to another for the original terrain map model

v_i	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5	v_6
v_1	0	6	5	7	4	6
v_2	5	0	2	6	4	7
v_3	5	3	0	2	6	7
v_4	8	6	4	0	3	5
v_5	6	2	5	3	0	4
v_6	7	8	6	5	6	0

Следует отметить, что предложенные правила преобразования исходного графа G_1 позволяют получить оптимальную, с точки зрения решаемой задачи, его часть G_1^* , обеспечивающую возможность построения дерева поиска решения в пространстве формального представления карты местности, включающего усеченное множество альтернативных маршрутов облета целей, включающее и минимальный по стоимости путь облета целей.

Построение дерева поиска оптимального маршрута облета целей. После оптимизации полного мультиграфа G_1 на основе допустимых эвристических правил его преобразования пп. 1 – 4, в результате получится ориентированный граф $G_1^* = (V_1^*, E_1^*)$ следующего вида (рис.2).

Назовем полученный таким образом граф G_1^* опорным графом для поиска оптимального маршрута облета целей, который формальным образом определяет карту местности с расположенными на ней целями и точками подлета и отлета АБЛА от заданного участка местности.

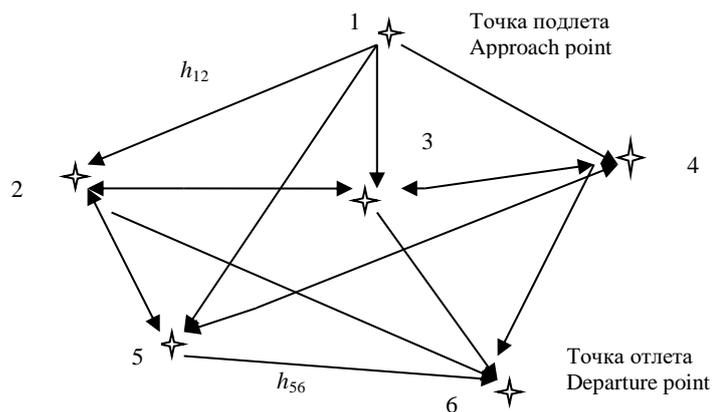


Рис. 2. Полученная после выполнения допустимых преобразований модель карты местности в виде ориентированного графа G_1^*
Fig. 2. The terrain map model obtained after performing admissible transformations in the form of a directed graph

На основе полученной таким образом опорной модели карты местности в виде ориентированного графа G_1^* , строится матрица смежности его вершин M_3 , элементы которой определяются штрафами пролета АБЛА между смежными целями, например, (табл.3).

Таблица 3. Матрица штрафов перелета АБЛА от одной цели к другой полученная на основе преобразованной модели карты местности
Table 3. Matrix of penalties for ABLA flight from one target to another based on the transformed terrain map model

v_i	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5	v_6
v_1	0	6	5	7	4	6
v_2	0	0	2	0	4	7
v_3	0	3	0	2	0	7
v_4	0	0	4	0	3	5
v_5	0	2	0	3	0	4
v_6	0	0	0	0	0	0

Затем по матрице смежности M_3 вершин графа G_1^* формируется опорное дерево допустимых маршрутов облета целей (рис.3).

Полученное таким образом дерево альтернативных маршрутов облета целей позволяет определить минимальный по стоимости маршрут облета целей путем сравнения между собой оценок их стоимости, которыми помечены его висячие вершины.

Для приведенного на рис.3 дерева минимальный маршрут облета АБЛА целей имеет стоимость, равную 15 условным единицам и определяется следующей структурой:

$$L_8 = \langle 1 \rightarrow 5 \rightarrow 4 \rightarrow 3 \rightarrow 2 \rightarrow 6 \rangle.$$

Таким образом, в общем случае предложенный метод поиска оптимальных маршрутов облета целей по исходно заданной формальным образом карты местности G_1 включает следующие основные этапы реализации.

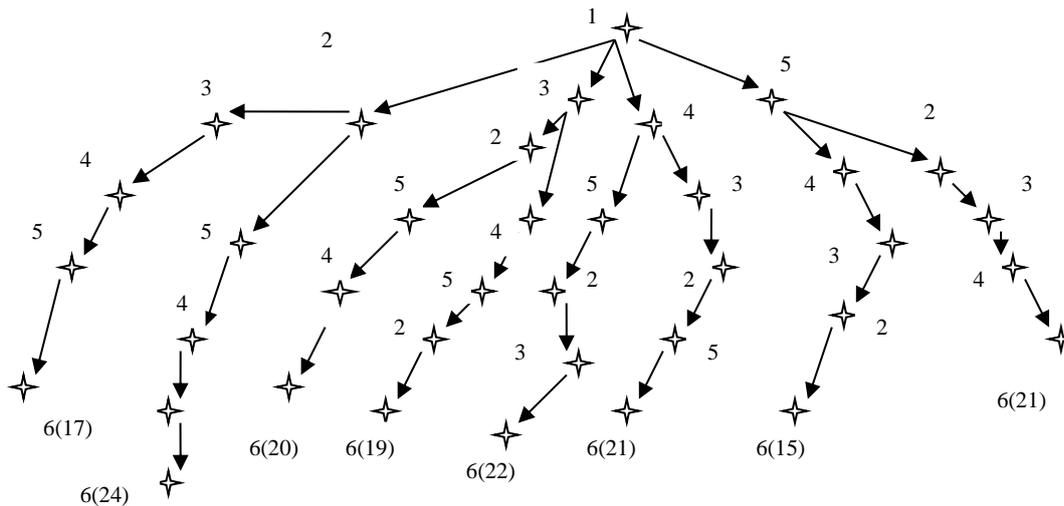


Рис. 3. Дерево допустимых маршрутов облета целей
Fig. 3. Tree of valid routes for flying over targets

1. Проведение оптимизации исходно заданной формальной модели карты местности G_1 на основе правил преобразования пп. 1 – 4. и получения на этой основе опорного графа G_1^* поиска минимального по штрафу маршрута облета целей.

2. Построение на основе полученного опорного графа G_1^* и соответствующей ему матрицы смежности, например, M_3 , дерева допустимых альтернативных маршрутов облета целей.

3. Выбор по построенному опорному дереву допустимых альтернатив минимального по штрафу маршрута облета целей.

Обсуждение результатов. Для обоснования эффективности предложенного принципа построения процедур планирования АБЛА оптимального маршрута облета целей, на основе опорного графа поиска G_1^* , докажем справедливость того, что в данном графе остается минимальный по сложности маршрут $L_{\min} \in G_1$.

Утверждение. После оптимизации исходного графа G_1 на основе правил преобразования пп. 1 – 4, для полученного в результате частичного графа G_1^* , $G_1^* \subset G_1$, на основе которого строится дерево поиска оптимального маршрута облета целей, выполняется условие $L_{\min}^* = L_{\min}$, где $L_{\min}^* \in G_1^*$ – минимальный по принятой стоимости маршрут облета целей, который включает дерево альтернатив, сформированное на основе опорного графа G_1^* ; $L_{\min} \in G_1$ – минимальный маршрут облета целей, имеющийся в исходном графе G_1 .

Доказательство. 1. Разобьем графы $G_1 = (V, E)$ и $G_1^* = (V^*, E^*)$ на связанные подграфы $G_{11}, G_{12}, G_{13} \subseteq G_1$ и $G_{11}^*, G_{12}^*, G_{13}^* \subseteq G_1^*$ такие, что $G_{11} \cap G_{12} \neq \emptyset$, $G_{12} \cap G_{13} \neq \emptyset$, $G_{11} \cap G_{13} = \emptyset$, $G_{11}^* \cap G_{12}^* \neq \emptyset$, $G_{12}^* \cap G_{13}^* \neq \emptyset$ и $G_{11}^* \cap G_{13}^* = \emptyset$.

Данное разбиение проводится таким образом, чтобы подграфы G_{11}, G_{11}^* включали только вершины, помеченные исходным положением АБЛА и смежные с ним цели. Подграфы G_{12}, G_{12}^* состоят из вершин, помеченных только целями, а подграфы G_{13}, G_{13}^* включают вершины, помеченные точкой отлета АБЛА и смежными с ней целями.

2. Необходимо отметить, что в графах G_1 и G_1^* точками подлета к заданному участку местности, а в графах G_{13}, G_{13}^* точками отлета АБЛА от данного участка помечены одни и те же вершины. Следовательно, длина путей полета от места дислокации летательного аппарата к местоположению начала облета целей и в первом, и во втором случае, является одинаковой. Оди-

наковыми также являются пути полета АБЛА от заданного участка местности к месту прибытия.

3. С одной стороны, очевидно, что для подграфов G_{12} и G_{12}^* справедливым является отношение $G_{12}^* \subset G_{12}$, а подграф G_{12}^* является частью графа G_{12} полученной после удаления из него ребер, помеченных максимальными штрафами. Отсюда, для данных подграфов, с одной стороны, выполняется условие «если $L_{2\min}^* \in G_{12}^*$, то $L_{2\min}^* \in G_{12}$ ».

С другой же стороны выполняется также условие «если $L_{2\min} \in G_{12}$, то и $L_{2\min} \in G_{12}^*$ ». Здесь $L_{2\min}^*, L_{2\min}$ – минимальные по штрафам маршруты облета целей, найденные, соответственно, на основе подграфов G_{12}^* и G_{12} . Следовательно, $L_{2\min}^* = L_{2\min}$.

Таким образом, справедливость равенства $L_{2\min}^* = L_{2\min}$ следует из того, что подграф G_{12}^* отличается от подграфа G_{12} только отсутствием в нем ребер, помеченных максимальными штрафами между смежными вершинами.

С другой стороны, в общем случае маршрут $L_{2\min}^*$ представляет собой путь, состоящий из ребер, которые согласно правилу удаления п.2.1, помечены минимальными штрафами перелета между смежными входящими в него целями (вершинами).

Следовательно, из условия $G_{12} \cap G_{12}^* = G_{12}^*$ следует, что если $L_{2\min} \in G_{12}$, то справедливым является также отношение $L_{2\min} \in G_{12}^*$. Отсюда, $L_{2\min}^* = L_{2\min}$, иначе существует другой маршрут $L_2(2) \in G_{12}$, который является меньше минимального маршрута $L_{2\min}^*$, а это противоречит тому, что дополнение $G = G_{12} \setminus G_{12}^*$ включает только ребра с максимальными штрафами, не участвующие в поиске минимального маршрута $L_{2\min}^* \in G_{12}^*$.

Иначе говоря, для каждого маршрута $L_i \in G_{12}$ выполняется условие $L_{2\min} \leq L_i$, где L_i – произвольный маршрут, найденный на основе подграфа G_{12} .

4. Распространяя естественным образом проведенные п. 3 рассуждения, связанные с доказательством выполнимости неравенства $L_{2\min} \leq L_i$, на пары подграфов $\langle G_{11}, G_{11}^* \rangle$ и $\langle G_{13}, G_{13}^* \rangle$, а, следовательно, и на графы G_1 и G_1^* в целом, можно также доказать справедливость неравенства $L_{\min}^* \leq L_i$. Таким образом, утверждение доказано.

Из доказанного утверждения вытекает, что предложенные правила преобразования пп. 2.1 - 2.3 позволяют оптимизировать полный граф G_1 и получить на этой основе такую его часть G_1^* , которая включает минимальный маршрут облета целей $L_{\min} \in G_1$.

Кроме того, частичный граф G_1^* обеспечивает существенное сокращение сравниваемых между собой альтернативных маршрутов облета целей в процессе решения задачи поиска, аналогичной задаче о коммивояжере, имеющей в общем случае экспоненциальную сложность решения [20].

Вывод. Предложенный принцип позволяет строить процедуры поиска оптимальных маршрутов облета целей АБЛА в реальном времени решения стоящей перед ним задачи.

В свою очередь, это обеспечивает возможность разработки эффективного решателя задач, позволяющего организовать автоматическое управление поведением автономного беспилотного летательного аппарата в нестабильной воздушной среде в процессе его целенаправленной деятельности.

Основной проблемой эвристических методов поиска оптимальных маршрутов облета заданных целей, формируемых на основе предложенного принципа сокращения перебора, является необходимость проведения допустимых преобразований неориентированного графа G_1 , формализующего карту местности в частичный граф G_1^* после каждой смены точек подлета и

отлета АБЛА от заданного участка местности. Однако данный недостаток компенсируется существенным снижением количества сравниваемых между собой альтернатив в процессе поиска оптимального маршрута облета целей в сравнении с эвристическими методами, основанными на переборе альтернативных вариантов решения данной задачи.

Данный эффект достигается за счет использования в качестве модели карты местности с расположенными на ней целями ориентированного графа G_1^* , который содержит только минимально необходимое количество дуг просматриваемых в процессе поиска оптимального маршрута облета, включающего все заданные цели.

Дальнейшее развитие проведенного исследования заключается в разработке процедур автоматической оценки штрафов, связанных с перелетами из одной точки в другую точку местности в соответствии с текущим состоянием воздушной среды, а также в разработке процедур автоматического построения дерева поиска оптимального маршрута облета целей в процессе полета АБЛА.

Библиографический список:

1. Абросимов В. К. Коллективы интеллектуальных летательных аппаратов. М., Наука, 2017, 304 с.
2. Рондан У. Б., Тимохи У. М. Малые беспилотные летательные аппараты. Теория и практика. М., Техносфера, 2016, 312 с.
3. Семенов С.С., Педан А.В., Воловиков В.С., Климов И.С. Анализ трудоемкости различных алгоритмических подходов для решения задачи коммивояжера//Системы управления, связи и безопасности. 2017. №1. С. 116 – 131.
4. La Valle S.M. Planning Algorithms. Cambridge, Cambridge University Press, 2006. 844 p.
5. Костик Ю.Л. Задача коммивояжера: приближенные алгоритмы по методу ветвей и границ с гарантированной точностью // Прикладная дискретная математика. 2019. № 45. С. 104 – 112.
6. Мамонов Н.В. Исследование влияния асимметрии на сложность решения задачи коммивояжера методом ветвей и границ // Современные информационные технологии и ИТ образование. 2019. Т.15. №1. С. 99 – 106.
7. Колесников А.В., Кириков И.А., Листопад С.В., Румовская С.Б., Доманицкий А.А. Решение сложных задач коммивояжера методами функциональных гибридных интеллектуальных систем / Под ред. А.В. Колесникова. М.: ИПИ РАН, 2011. 295 с.
8. Герпов А.В., Шаталов Д.А., Митасов Р.А. Практическая польза использования генетических алгоритмов на примере решения задачи коммивояжера//Труды Ростовского университета путей сообщения, 1917, № 4, с. 93 – 97.
9. Курейчик В.В., Курейчик В.М. Генетический алгоритм определения пути коммивояжера // Известия РАН. Теория и системы управления, 2006, № 1, с. 94-100.
10. Dorigo M., Stützle T. Ant colony optimization: overview and recent advances. Handbook of metaheuristics. Berlin: Springer - Cham, 2019, pp. 311 – 351.
11. Кубил В.Н., Мохов В.А. Многоколонийный муравьиный алгоритм с модификациями для решения многокритериальных задач маршрутизации транспорта//Известия высших учебных заведений. Электромеханика. Т. 61, № 6. 2018. С. 94 – 109.
12. Лиго Тань, Фомичёв А.В. Планирование пространственного маршрута беспилотных летательных аппаратов с использованием методов частичного целочисленного линейного программирования // Вестник МГТУ им Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение, 2016, №2, с. 53 – 66.
13. Лебедев Г.Н., Ефимов А.В. Применение динамического программирования для маршрутизации облета мобильных объектов в контролируемом регионе//Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета, 2011, №6, с. 234 – 241.
14. Хачай М.Ю., Огородников Ю.Ю. Эффективная аппроксимация задачи об оптимальной маршрутизации в метрических пространствах фиксированной размерности // Доклады Российской академии наук. Математика, информатика, процессы управления. 2020, Т. 493, №1, с. 74 – 80.
15. Kaluder H., Brezak M., Petrovic I. A visibility graph based method for path planning in dynamic environments. MIPRO, 2011, Proceedings of the 34 th International Convention, Opatija, Croatia, 2011, pp. 717 –721.
16. Kelly A. Mobile Robotics: Mathematics, Models, and Methods. Cambridge, Cambridge University Press, 2013. 808 p.
17. Мелехин В.Б., Хачумов М.В. Планирование автономным беспилотным летательным аппаратом эффективных маршрутов облета целей // Авиакосмическое приборостроение, 2020, № 4, с. 3 – 14.

18. Черный М. А., Кораблин В. И. Воздушная навигация. М., Транспорт, 1991, 432 с.
19. Мелехин В.Б., Хачумов В.М. Управление эффективной реализацией технологических процессов механической обработки деталей в машиностроении // Проблемы управления, 2020, № 1, с. 71 – 82.
20. Курейчик В.М., Лагунова Ю.А. Задачи о коммивояжере. Обзор и методы решения. Palmarium Academic Publishing, 2019. 60 с.

References:

1. Abrosimov V.K. Kollektivny intellektual'nyh letatel'nyh apparatov [Teams of intelligent aircrafts]. Moscow, Nauka Publ., 2017, 304 p. (In Russ)
2. Rondan U. B., Timoti U. M. Malye bespilotnye letatel'nye apparaty. Teoriya i praktika [Small unmanned aerial vehicles. Theory and practice]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2016, 312 p. (In Russ)
3. Semenov S.S., Pedan A.V., Volovikov V.S., Klimov I.S. Analiz trudoemkosti razlichnyh algoritmicheskikh podhodoov dlya resheniya zadachi kommivoyazhera [Analysis of the complexity of various algorithmic approaches for solving the traveling salesman problem]. Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti [Control systems, communications and security], 2017, no 1, pp. 116 – 131. (In Russ)
4. La Valle S.M. Planning Algorithms. Cambridge, Cambridge University Press, 2006, 844 p.
5. Kostik Yu.L. Zadacha kommivoyazhera: priblizhennyye algoritmy po metodu vetvej i granic s garantirovannoy tochnost'yu [Traveling Salesman Problem: Approximate Algorithms Using the Branch and Bound Method with Guaranteed Accuracy]. Prikladnaya diskretnaya matematika [Applied Discrete Mathematics], 2019, no 45, pp. 104 – 112. (In Russ)
6. Mamonov N.V. Issledovanie vliyaniya assimetrii na slozhnost' resheniya zadachi kommivoyazhera metodom vetvej i granic [Investigation of the influence of asymmetry on the complexity of solving the traveling salesman problem by the branch and bound method]. Sovremennyye informacionnyye tekhnologii i IT obrazovanie [Modern information technologies and IT education], 2019., no 1(15), pp. 99 – 106. (In Russ)
7. Kolesnikov A.V., Kirikov I.A., Listopad S.V., Rumovskaya S.B., Domanickij A.A. Reshenie slozhnyh zadach kommivoyazhera metodami funkcional'nyh gibridnyh intellektual'nyh system [Solving Complex Traveling Salesman Problems by Methods of Functional Hybrid Intelligent Systems]. Pod red. A.V. Kolesnikova. Moscow, IPI RAN Publ, 2011, 295 p. (In Russ)
8. Gerpov A.V., Shatalov D.A., Mitasov R.A. Prakticheskaya pol'za ispol'zovaniya geneticheskikh algoritmov na primere resheniya zadachi kommivoyazhera [The practical benefits of using genetic algorithms on the example of solving the traveling salesman problem]. Trudy Rostovskogo universiteta putej soobshcheniya [Proceedings of the Rostov University of Railways], 1917, no 4, pp. 93 – 97. (In Russ)
9. Kurejchik V.V., Kurejchik V.M. Geneticheskij algoritm opredeleniya puti kommivoyazhera [Genetic Algorithm for Determining the Traveling Salesman's Path]. Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravlenii [Journal of computer and systems sciences international], 2006, no 1, pp. 94 –100.
10. Dorigo M., Stützle T. Ant colony optimization: overview and recent advances. Handbook of metaheuristics. Berlin, Springer - Cham, 2019, pp. 311 – 351.
11. Kubil V.N., Mohov V.A. Mnogokolonial'nyj murav'inyj algoritm s modifikacijami dlya resheniya mnogokriterial'nyh zadach marshrutizacii transporta [Multicolonial ant algorithm with modifications for solving multicriteria transport routing problems]. Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Elektromekhanika [Izvestiya vysshikh uchebnykh zavod. Electromechanics], no 1(61), 2018, pp. 94 – 109. (In Russ)
12. Ligo Tan', Fomichyov A.V. Planirovanie prostranstvennogo marshruta bespilotnyh letatel'nyh apparatov s ispol'zovaniem metodov chastichnogo celochislennogo linejnogo programmirovaniya [Planning the spatial route of unmanned aerial vehicles using partial integer linear programming methods]. Vestnik MGTU im N.E. Baumana. Ser. Priborostroenie [Vestnik MGTU named after N.E. Bauman. Ser. Instrument making], 2016, no 2, pp. 53 – 66. (In Russ)
13. Lebedev G.N., Efimov A.V. Primenenie dinamicheskogo programmirovaniya dlya marshrutizacii obleta mobil'nyh ob"ektov v kontroliruемом regione [Application of dynamic programming for routing flying around mobile objects in the controlled region]. Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta [Bulletin of the Samara State Aerospace University], 2011, no 6, pp. 234 – 241. (In Russ)
14. Hachaj M.Yu., Ogorodnikov Yu.Yu. Effektivnaya approksimaciya zadachi ob optimal'noj marshrutizacii v metriceskikh prostranstvah fiksirovannoj razmernosti [Effective approximation of the problem of optimal routing in metric spaces of fixed dimension]. Doklady Rossijskoj akademii nauk. Matematika, informatika, processy upravleniya [Doklady Russian Academy of Sciences. Mathematics, informatics, control processes], 2020, no 1(493), pp. 74 – 80. (In Russ)
15. Kaluder H., Brezak M., Petrovic I. A visibility graph based method for path planning in dynamic environments. MIPRO, 2011, Proceedings of the 34 th International Convention, Opatija, Croatia, 2011, pp. 717–721.
16. Kelly A. Mobile Robotics: Mathematics, Models, and Methods. Cambridge, Cambridge University Press, 2013. 808 p.
17. Melekhin V.B., Hachumov M.V. Planirovanie avtonomnym bespilotnym letatel'nyim apparatom effektivnyh marshrutov obleta celej [Planning for an autonomous unmanned aerial vehicle of effective routes to fly over targets]. Aviakosmicheskoe priborostroenie [Aviation and Space Instrument Engineering], 2020, no 4, pp. 3 – 14. (In Russ)

18. Chernyj M. A., Korablin V. I. Vozdushnaya navigaciya [Air navigation]. Moscow, Transport Publ., 1991, 432 p. (In Russ)

19. Melekhin V.B., Nachumov V.M. Upravlenie effektivnoj realizaciej tekhnologicheskikh processov mekhanicheskoy obrabotki detalej v mashinostroenii [Management of the effective implementation of technological processes of mechanical processing of parts in mechanical engineering]. Problemy upravleniya [Problems of Management], 2020, no 1, pp. 71 – 82.

20. Kurejchik V.M., Lagunova Yu.A. Zadachi o kommivoyazhere. Obzor i metody resheniya [Traveling Salesman Problems. Review and methods of solution]. Palmarium Academic Publishing, 2019. 60 с. (In Russ)

Сведения об авторах:

Мелехин Владимир Борисович, доктор технических наук, профессор, кафедра программного обеспечения вычислительной техники и автоматизированных систем; e-mail: pashka1602@rambler.ru

Хачумов Михаил Вячеславович, кандидат физико-математических наук, старший преподаватель, e-mail: khmike@inbox.ru

Information about the author:

Vladimir B. Melekhin, Dr. Sci. (Technical), Professor, Department of Computer Software and Automated Systems; e-mail: pashka1602@rambler.ru

Mikhail V. Khachumov, Cand. Sci. (Physical and Mathematical), Senior Lecturer, e-mail: khmike@inbox.ru

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 19.01.2021.

Принята в печать 18.02.2021.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 19.01.2021.

Accepted for publication 18.02.2021.

Для цитирования: Е.С.Овчинникова. Графовые модели динамики реализации сетевых атак в автоматизированных системах органов внутренних дел. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2021; 48 (1): 119-129. DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-1-119-129

For citation: E.S. Ovchinnikova. Graph models of the dynamics of network attacks in automated systems of internal affairs bodies. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2021; 48(1): 119-129. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-1-119-129

**ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ
COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT**

УДК 004.056

DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-1-119-129

ГРАФОВЫЕ МОДЕЛИ ДИНАМИКИ РЕАЛИЗАЦИИ СЕТЕВЫХ АТАК В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ ОРГАНОВ ВНУТРЕННИХ ДЕЛ

Е.С. Овчинникова

*Воронежский институт МВД России,
394065, г. Воронеж, пр. Патриотов, 53, Россия,*

Резюме: Цель. Важнейшей задачей теории и практики обеспечения информационной безопасности автоматизированных систем при их эксплуатации в защищенном исполнении на объектах информатизации органов внутренних дел является анализ процесса функционирования систем защиты конфиденциального информационного ресурса от несанкционированного доступа в условиях сетевых атак, что предполагает моделирование процесса их реализации и, в первую очередь, разработку графовых моделей динамики реализации основных типов сетевых атак. **Метод.** Методом решения данной задачи является математическое моделирование процесса реализации сетевых атак в защищенных автоматизированных системах органов внутренних дел посредством построения и описания графовых моделей типовых сетевых атак на конфиденциальный информационный ресурс в динамике их реализации. **Результат.** На основе анализа типовых сетевых атак на информационный ресурс современных АС, эксплуатируемых в защищенном исполнении на объектах информатизации органов внутренних дел, разработаны графовые модели данных атак в динамике их реализации с выделением ключевых элементов и функциональных компонентов моделей, идентичных реальным сетевым атакам. Разработанные графовые модели позволяют наглядно представить процесс реализации основных вредоносных функций рассмотренных сетевых атак и учесть предполагаемые действия злоумышленника. **Вывод.** Результаты проведенного исследования могут быть использованы при разработке имитационных моделей процесса реализации типовых сетевых атак на конфиденциальный информационный ресурс с целью получения вероятностно-временных характеристик в виде времен выполнения каждой атакой вредоносных функций для проведения количественной оценки опасности их реализации. Результаты исследования могут стать основой для формирования частной модели актуальных атак для конкретной АС и обоснования количественных требований к перспективным программным средствам и системам информационной безопасности на объектах информатизации органов внутренних дел в соответствии с требованиями действующей нормативной документации.

Ключевые слова: автоматизированная система, система защиты информации, несанкционированный доступ, сетевая атака, графовая модель

GRAPH MODELS OF THE DYNAMICS OF NETWORK ATTACKS IN AUTOMATED SYSTEMS OF INTERNAL AFFAIRS BODIES

E.S. Ovchinnikova

*Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia,
53 Patriotov St., Voronezh 394065, Russia*

Abstract. Objective. *The most important task of the theory and practice of ensuring the information security of automated systems during their operation in a secure version at the objects of computerization of internal affairs bodies is to analyze the functioning process of systems for protecting confidential information resources from unauthorized access in case of network attacks, which involves modeling the process of their implementation and the development of graph models of the implementation dynamics of the main types of network attacks. Methods.* *The method for solving this problem is a mathematical simulation of implementing network attacks in protected automated systems of internal affairs bodies by constructing and describing graph models of typical network attacks on a confidential information resource in the dynamics of their implementation. Results.* *Based on the analysis of typical network attacks on the information resource of modern automated systems operated in a secure version at the objects of computerization of internal affairs bodies, graph models of these attacks in the dynamics of their implementation were developed, with the allocation of key elements and functional components of models identical to real network attacks. The developed graph models allow visualizing the process of implementing the main malicious functions of the considered network attacks and consider the attacker's alleged actions. Conclusion.* *The conducted research results can be used to develop simulation models of typical network attacks on a confidential information resource to obtain probabilistic-temporal characteristics in the form of the execution times of each attack of malicious functions for a quantitative risk assessment of their implementation. This can become the basis for forming a specific model of actual attacks for a specific automated system and substantiating quantitative requirements for promising software and information security systems at the computerization facilities of the internal affairs bodies following the current regulatory documentation requirements.*

Keywords: *automated system, information security system, unauthorized access, network attack, graph model*

Введение. Для предотвращения попыток осуществления удаленного несанкционированного доступа (НСД), реализуемого посредством сетевых атак на конфиденциальный информационный ресурс автоматизированных систем (АС) органов внутренних дел (ОВД), широко используются системы защиты информации (СЗИ) от НСД [1,2]. Разработка и эксплуатация данных систем на объектах информатизации ОВД приводит к необходимости научного осмысления процесса их функционирования в условиях реализации сетевых атак, что, в свою очередь, предполагает моделирование динамики реализации сетевых атак в защищенных АС ОВД [3,4]. Анализ научных работ, посвященных исследованию угроз НСД в АС, показал, что предлагаемые, в большинстве из них, формальные модели являются статическими, позволяющими проводить лишь качественную оценку опасности реализации угроз, не обеспечивающую достаточную точность оценивания [5-9]. Немногочисленные научные труды, исследующие процесс реализации угроз удаленного доступа применительно к элементам информационно-телекоммуникационных систем и предлагающие аналитические модели количественной оценки опасности [10,11], являются теоретически интересными, но недостаточно обеспечивающими практическую реализацию сетевых атак в современных АС, эксплуатируемых в защищенном исполнении на объектах информатизации ОВД.

Таким образом, существует объективная необходимость разработки совокупности математических моделей процесса реализации основных (типовых) сетевых атак на информационный ресурс АС, реально эксплуатируемых в защищенном исполнении на объектах информатизации ОВД, что требует, в первую очередь, построения их графовых моделей.

Постановка задачи. Целью исследования является разработка графовых моделей динамики реализации основных типов сетевых атак на информационный ресурс современных АС, эксплуатируемых в защищенном исполнении на объектах информатизации ОВД. Разработанные графовые модели послужат основой для дальнейшего создания аналитических и имитационных моделей, которые в отличие от существующих математических моделей позволят исследовать процесс реализации типовых сетевых атак в динамике конфликтного взаимодействия

путем определения вероятностно-временных характеристик (ВВХ) для построения точных количественных оценок опасности их реализации на этапах всего жизненного цикла функционирования защищенных АС ОВД.

Методы исследования. Методом исследования является математическое моделирование процесса реализации сетевых атак на информационный ресурс защищенных АС ОВД посредством построения и описания графовых моделей типовых сетевых атак в динамике их реализации. На основе анализа 217 угроз, представленных в настоящее время в банке данных угроз безопасности информации, разработанном Федеральной службой по техническому и экспертному контролю (ФСТЭК) России (bdu.fstec.ru) [12], особенностей эксплуатации современных защищенных АС на объектах информатизации ОВД, результатов опроса экспертов в области информационной безопасности (ИБ) выделены типовые (наиболее опасные и часто реализуемые) сетевые атаки на информационный ресурс АС ОВД с учетом их источников, объектов воздействия и возможных последствий реализации (причиненного ущерба): анализ сетевого трафика, сканирование сети, «парольная» атака, подмена доверенного объекта сети, навязывание ложного маршрута, внедрение ложного объекта сети, отказ в обслуживании, удаленный запуск приложений [13, 14].

Моделирование динамики реализации типовых сетевых атак в защищенных АС ОВД представляет собой сложную двухэтапную задачу. На начальном этапе разработки графовых моделей для каждой сетевой атаки осуществляется определение их элементов и взаимосвязей между ними, полностью идентичных основным типам сетевых атак, реально реализуемых в защищенных АС ОВД, с целью дальнейшего получения их свойств и характеристик. Для визуального представления процесса функционирования вредоносных механизмов реализации сетевых атак в АС, эксплуатируемых в защищенном исполнении на объектах информатизации ОВД, необходимо разработать модели динамики реализации основных типов сетевых атак на конфиденциальный информационный ресурс на основе теории графов с конечным числом состояний [15-17].

Модель процесса функционирования каждой из основных типов сетевых атак может быть представлена в виде простого ориентированного графа $D = (V, E)$, в котором: V – конечное множество вершин v_1, v_2, \dots, v_n , обозначающих все возможные состояния (вредоносные функции) рассматриваемой сетевой атаки; E – конечное множество дуг e_1, e_2, \dots, e_m , обозначающих все возможные переходы между состояниями. Переходы обозначены как $e_k = (v_i, v_j)$ в случае выхода из вершины графа нескольких дуг. Маршрут в графе D представляет собой последовательность действий злоумышленника при реализации сетевой атаки на информационный ресурс защищенной АС ОВД [16].

Обсуждение результатов. Графовая модель, описывающая основные этапы процесса реализации сетевой атаки «Анализ сетевого трафика» (сниффинг пакетов) на информационный ресурс АС ОВД, представлена на рис.1, а описание ее вредоносных функций – в табл.1.

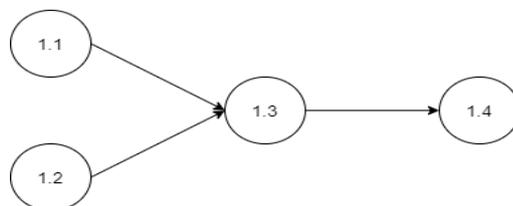


Рис.1. Граф, описывающий механизм реализации атаки «Анализ сетевого трафика»
Fig. 1. Graph describing the mechanism for implementing the Network Traffic Analysis attack

Таблица 1. Сетевая атака «Анализ сетевого трафика»
Table 1. Network attack «Network traffic analysis»

№ Состояния No. Fortunes	Вредоносные функции, выполняемые сетевой атакой Malicious functions performed by a network attack	e_k	(v_i, v_j)
1.1	Атакуемые хосты готовы The attacked hosts are ready	$e_{1.1}$	$(v_{1.1}, v_{1.3})$,
1.2	Хост злоумышленника физически готов к перехвату трафика The attacker's host is physically ready to intercept traffic	$e_{1.2}$	$(v_{1.2}, v_{1.3})$
1.3	Передача пакета между атакуемыми хостами, перехват пакета Transferring a packet between attacked hosts, intercepting a packet	$e_{1.3}$	$(v_{1.3}, v_{1.4})$
1.4	Анализ пакета, извлечение из него полезных данных (пароля, имени пользователя) Analysis of the package, extracting useful data from it (password, username)	$e_{1.4}$	

Рис. 1 показывает, что в состоянии 1.4 происходит реализация атаки «Анализ сетевого трафика» (сниффинг пакетов).

На рис. 2 представлена графовая модель, описывающая основные этапы процесса реализации сетевой атаки «Сканирование сети», а в табл. 2 приведено описание ее вредоносных функций.

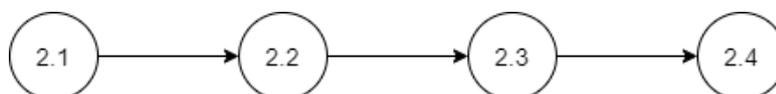


Рис. 2. Граф, описывающий механизм реализации атаки «Сканирование сети»
Fig. 2. A graph describing the mechanism for implementing the Network Scanning attack

Рис. 2 показывает, что состояние 2.4 соответствует реализации атаки «Сканирование сети».

Таблица 2. Сетевая атака «Сканирование сети»
Table 2. Network attack «Scanning the network»

№ Состояния No. Fortunes	Вредоносные функции, выполняемые сетевой атакой Malicious functions performed by a network attack	e_k	(v_i, v_j)
2.1	Хост злоумышленника готов, программа настроена и запущена The attacker's host is ready, the program is configured and running	$e_{2.1}$	$(v_{2.1}, v_{2.2})$
2.2	Определение активных хостов сети при помощи ICMP-запроса Identifying active hosts on a network using an ICMP request	$e_{2.2}$	$(v_{2.2}, v_{2.3})$
2.3	Определение типов операционных систем активных хостов сети Determining the types of operating systems of active hosts on the network	$e_{2.3}$	$(v_{2.3}, v_{2.4})$
2.4	Сканирование сервисов на активных хостах сети Scanning services on active hosts on the network	$e_{2.4}$	

Графовая модель, описывающая основные этапы процесса реализации «Парольной» сетевой атаки на информационный ресурс АС ОВД, представлена на рис. 3, а описание ее вредоносных функций – в табл. 3.

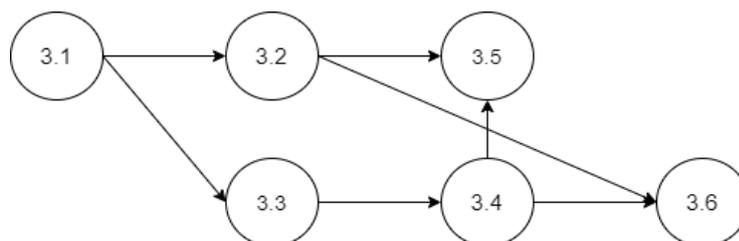


Рис. 3. Граф, описывающий механизм реализации «Парольной» сетевой атаки
Fig. 3. A graph describing the mechanism for implementing a «Password» network attack

Рис. 3 показывает, что в состоянии 3.5 происходит реализация «Парольной» сетевой атаки, а в состоянии 3.6 – ее срыв.

Таблица 3. «Парольная» сетевая атака
Table 3. «Password» network attack

№ Состояния No. Fortunes	Вредоносные функции, выполняемые сетевой атакой Malicious functions performed by a network attack	e_k	(v_i, v_j)
3.1	Хост злоумышленника готов, включился в сеть общего пользования The attacker's host is ready, connected to the public network	$e_{3.1}$	$(v_{3.1}, v_{3.2}),$ $(v_{3.1}, v_{3.3})$
3.2	Атакуемый хост запрашивает пароль The attacked host asks for a password	$e_{3.2}$	$(v_{3.2}, v_{3.5}),$ $(v_{3.2}, v_{3.6})$
3.3	Хост злоумышленника, не зная пароля, подбирает его по специальному словарю или путем прямого перебора The attacker's host, not knowing the password, picks it up using a special dictionary or by brute-force	$e_{3.3}$	$(v_{3.3}, v_{3.4})$
3.4	Хост злоумышленника завершил подбор пароля Attacker host completed password guessing	$e_{3.4}$	$(v_{3.4}, v_{3.5}),$ $(v_{3.4}, v_{3.6})$
3.5	Пароль подобран правильно, осуществление НСД к атакуемому хосту The password was chosen correctly, the implementation of the unauthorized attack to the attacked host	$e_{3.5}$	
3.6	Пароль подобран неправильно, срыв атаки Wrong password, attack thwarted	$e_{3.6}$	

На рис. 4 представлена графовая модель реализации сетевой атаки «Подмена доверенного объекта сети» (IP-spoofing).

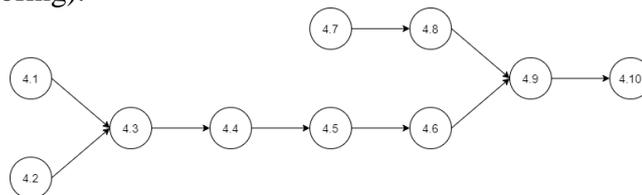


Рис. 4. Граф, описывающий механизм реализации сетевой атаки «Подмена доверенного объекта сети»
Fig. 4. A graph describing the mechanism for implementing a network attack «Substitution of a trusted network object»

Состояние 4.10 соответствует реализации атаки «Подмена доверенного объекта сети». В табл. 4 приведено описание ее вредоносных функций.

Таблица 4. Сетевая атака «Подмена доверенного объекта сети»
Table 4. Network attack «Spoofing a trusted network object»

№ Состояния No. Fortunes	Вредоносные функции, выполняемые сетевой атакой Malicious functions performed by a network attack	e_k	(v_i, v_j)
4.1	Атакуемый хост готов The attacked host is ready	$e_{4.1}$	$(v_{4.1}, v_{4.3})$
4.2	Хост злоумышленника готов к проведению атаки SYN-flood и ожидает перезагрузки атакуемого хоста The attacker's host is ready for a SYN-flood attack and is waiting for the attacked host to reboot	$e_{4.2}$	$(v_{4.2}, v_{4.3})$
4.3	Перезагрузка атакуемого хоста (в результате атаки SYN-flood или самопроизвольная), атакуемый хост недоступен Reboot of the attacked host (as a result of a SYN-flood attack or spontaneous), the attacked host is unavailable	$e_{4.3}$	$(v_{4.3}, v_{4.4})$
4.4	Отправка C-SYN и обработка его сервером Sending C-SYN and processing it by the server	$e_{4.4}$	$(v_{4.4}, v_{4.5})$
4.5	Прием S-SYN хостом злоумышленника Reception of S-SYN by the attacker's host	$e_{4.5}$	$(v_{4.5}, v_{4.6})$
4.6	Отправка C-SYN2 от имени атакуемого хоста и обработка его сервером Sending C-SYN2 on behalf of the attacked host and processing it by the server	$e_{4.6}$	$(v_{4.6}, v_{4.9})$
4.7	Хост злоумышленника готов к подбору S-ACK2 Attacker host ready to brute-force S-ACK2	$e_{4.7}$	$(v_{4.7}, v_{4.8})$
4.8	Подбор S-ACK2 хостом злоумышленника Hacking S-ACK2 by the attacker's host	$e_{4.8}$	$(v_{4.8}, v_{4.9})$
4.9	Отправка подходящего S-ACK2 и его принятие, установка соединения с правами атакуемого хоста Sending a suitable S-ACK2 and accepting it, establishing a connection with the rights of the attacked host	$e_{4.9}$	$(v_{4.9}, v_{4.10})$
4.10	Отправка данных, результат – выполнение сервером команды злоумышленника Sending data, the result is the execution of the attacker's command by the server	$e_{4.10}$	

Графовая модель, описывающая основные этапы процесса реализации сетевой атаки «Навязывание ложного маршрута» на информационный ресурс автоматизированной системы ОВД, представлена на рис. 5, а описание ее вредоносных функций – в табл. 5.

Рис. 5 показывает, что в состоянии 5.6 происходит реализация сетевой атаки «Навязывание ложного маршрута».

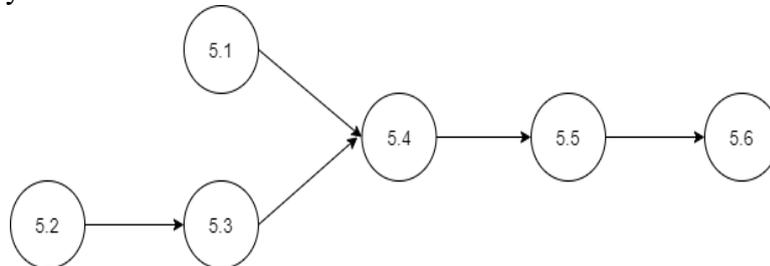


Рис. 5. Граф, описывающий механизм реализации сетевой атаки «Навязывание ложного маршрута»

Fig. 5. A graph describing the mechanism for implementing a network attack «Imposing a false route»

**Таблица 5. Сетевая атака «Навязывание ложного маршрута»
 Table 5. False route imposition network attack**

№ Состояния No. Fortunes	Вредоносные функции, выполняемые сетевой атакой Malicious functions performed by a network attack	e_k	(v_i, v_j)
5.1	Атакуемый хост готов The attacked host is ready	$e_{5.1}$	$(v_{5.1}, v_{5.4})$
5.2	Злоумышленник активен The attacker is active	$e_{5.2}$	$(v_{5.2}, v_{5.3})$
5.3	Настройка программы Program setting	$e_{5.3}$	$(v_{5.3}, v_{5.4})$
5.4	Передача на атакуемый хост и принятие им ложных ICMP-redirect-сообщений Sending and receiving false ICMP-redirect messages to the attacked host	$e_{5.4}$	$(v_{5.4}, v_{5.5})$
5.5	Изменение таблицы маршрутизации атакуемого хоста Modifying the routing table of the attacked host	$e_{5.5}$	$(v_{5.5}, v_{5.6})$
5.6	Перехват и анализ трафика атакуемого хоста (для внутрисегментной атаки). Нарушение маршрутизации атакуемого хоста (для межсегментной атаки) Interception and analysis of the attacked host's traffic (for intra-segment attacks). Violation of routing of the attacked host (for cross-segment attack)	$e_{5.6}$	

На рис. 6 представлена графовая модель, описывающая основные этапы процесса реализации сетевой атаки «Внедрение ложного объекта сети» (ARP-spoofing).

В табл. 6 приведено описание ее вредоносных функций.

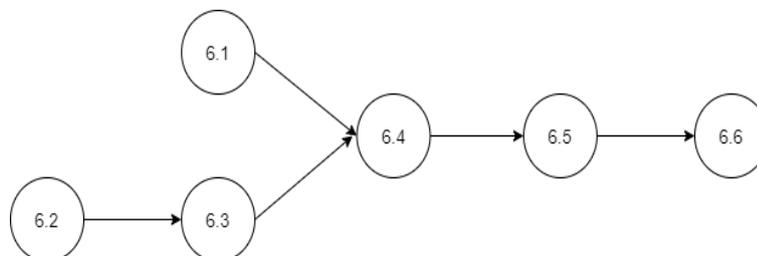


Рис. 6. Граф, описывающий механизм реализации сетевой атаки «Внедрение ложного объекта сети»

Fig. 6. A graph describing the mechanism for implementing a network attack «Injection of a false network object»

Таблица 6. Сетевая атака «Внедрение ложного объекта сети»
Table 6. Network attack «Injection of a false network object»

№ Состояния No. Fortunes	Вредоносные функции, выполняемые сетевой атакой Malicious functions performed by a network attack	e_k	(v_i, v_j)
6.1	Атакуемый хост формирует широковещательный ARP-запрос The attacked host generates a broadcast ARP request	$e_{6.1}$	$(v_{6.1}, v_{6.4})$
6.2	Хост злоумышленника находится внутри сегмента сети атакуемого хоста The attacker's host is inside the attacked host's network segment	$e_{6.2}$	$(v_{6.2}, v_{6.3})$
6.3	Подготовка хоста злоумышленника к проведению атаки (сканирование MAC-адресов хостов сети и настройка программы) Preparing an attacker host for an attack (scanning the MAC addresses of network hosts and configuring programs)	$e_{6.3}$	$(v_{6.3}, v_{6.4})$
6.4	Отправка ложного ARP-ответа и принятие его атакуемым хостом Sending a bogus ARP response and accepting it by the attacked host	$e_{6.4}$	$(v_{6.4}, v_{6.5})$
6.5	Изменение ARP-таблицы атакуемого хоста Modifying the ARP table of the attacked host	$e_{6.5}$	$(v_{6.5}, v_{6.6})$
6.6	Перехват и анализ трафика атакуемого хоста Interception and analysis of the traffic of the attacked host	$e_{6.6}$	

Рис. 7. показывает, что в состоянии 7.5 происходит реализация сетевой атаки «Отказ в обслуживании». Описание ее вредоносных функций – в табл. 7.

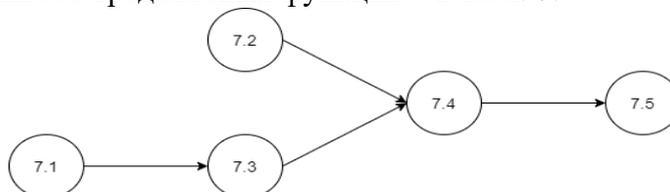


Рис.7. Граф, описывающий механизм реализации сетевой атаки «Отказ в обслуживании»
Fig. 7. Graph describing the mechanism for implementing a network denial of service attack

Таблица 7. Сетевая атака «Отказ в обслуживании»
Table 7. Network attack «Denial of service»

№ Состояния No. Fortunes	Вредоносные функции, выполняемые сетевой атакой Malicious functions performed by a network attack	e_k	(v_i, v_j)
7.1	Хост злоумышленника готов The attacker host is ready	$e_{7.1}$	$(v_{7.1}, v_{7.3})$
7.2	Атакуемый хост готов принять SYN-пакеты с несуществующим обратным адресом в очередь неоткрытых соединений The attacked host is ready to accept SYN packets with a non-existent return address in the queue of unopened connections	$e_{7.2}$	$(v_{7.2}, v_{7.4})$
7.3	Запуск и настройка программы для SYN-flood Launching and configuring the SYN-flood program	$e_{7.3}$	$(v_{7.3}, v_{7.4})$
7.4	Отправка SYN-пакетов и постановка их в очередь атакуемому хосту Sending SYN packets and queuing them to the attacked host	$e_{7.4}$	$(v_{7.4}, v_{7.5})$
7.5	Переполнение очереди атакуемого хоста, он не в состоянии обрабатывать другие запросы The target host's queue is overflowing, it is unable to process other request	$e_{7.5}$	

На рис. 8. представлена графовая модель, описывающая основные этапы процесса реализации сетевой атаки «Удаленный запуск приложений» (IP-hijacking), а в табл.8 приведено описание ее вредоносных функций. Состояние 8.8 соответствует реализации сетевой атаки «Удаленный запуск приложений».

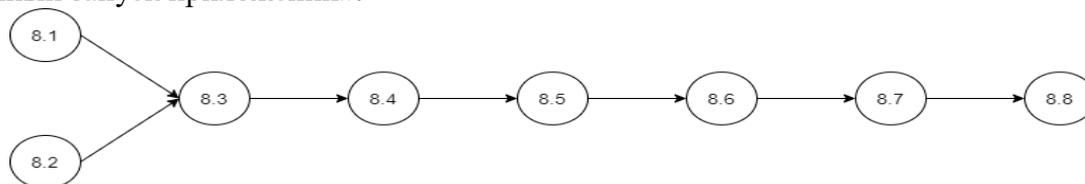


Рис. 8. Граф, описывающий механизм реализации сетевой атаки «Удаленный запуск приложений»
Fig. 8. Graph describing the mechanism for implementing a network attack «Remote Application Launch»

Таблица 8. Сетевая атака «Удаленный запуск приложений»
Table 8. Remote Application Launch Network Attack

№ Состояния No. Fortunes	Вредоносные функции, выполняемые сетевой атакой Malicious functions performed by a network attack	e_k	(v_i, v_j)
8.1	Атакуемые хосты готовы The attacked hosts are ready	$e_{8.1}$	$(v_{8.1}, v_{8.3})$
8.2	Хост злоумышленника готов к перехвату трафика Attacker host is ready to intercept traffic	$e_{8.2}$	$(v_{8.2}, v_{8.3})$
8.3	Обмен пакетами между атакуемыми хостами для установления соединения, перехват S-SYN и C-ACK Exchange of packets between attacked hosts to establish a connection, interception of S-SYN and C-ACK	$e_{8.3}$	$(v_{8.3}, v_{8.4})$
8.4	Отправка RST от имени второго атакуемого хоста, закрытие соединения между атакуемыми хостами для первого из них Sending RST on behalf of the second attacked host, closing the connection between the attacked hosts for the first of them	$e_{8.4}$	$(v_{8.4}, v_{8.5})$
8.5	Отправка первым атакуемым хостом S-SYN2 для второго хоста, перехват S-SYN2, обработка первым атакуемым хостом C-SYN2 The first attacked host sends S-SYN2 for the second host, intercepts S-SYN2, and is processed by the first attacked host C-SYN2	$e_{8.5}$	$(v_{8.5}, v_{8.6})$
8.6	Отправка C-SYN2 от имени второго атакуемого хоста, перехват S-SYN2, возникновение ACK-бури между атакуемыми хостами Sending C-SYN2 on behalf of the second attacked host, intercepting S-SYN2, occurrence of an ACK storm between the attacked hosts	$e_{8.6}$	$(v_{8.6}, v_{8.7})$
8.7	Отправка S-ACK2 от имени второго атакуемого хоста, принятие S-ACK2, установка соединения с правами второго атакуемого хоста Sending S-ACK2 on behalf of the second attacked host, accepting S-ACK2, establishing a connection with the rights of the second attacked host	$e_{8.7}$	$(v_{8.7}, v_{8.8})$
8.8	Обмен модифицированными данными со вторым атакуемым хостом по ACK, с первым – по ACK-2 Exchange of modified data with the second attacked host via ACK, with the first via ACK-2	$e_{4.8}$	

Вывод. В статье разработаны графовые модели динамики реализации типовых сетевых атак на информационный ресурс современных АС, эксплуатируемых в защищенном исполнении на объектах информатизации ОВД.

Выделены ключевые элементы и функциональные компоненты моделей, что позволяет наглядно представить процесс реализации их основных вредоносных функций и учесть предполагаемые действия злоумышленника.

На основе представленных графовых моделей и их элементов, полностью идентичных типовым сетевым атакам, реально воздействующим на информационный ресурс защищенных АС ОВД, могут быть разработаны динамические модели их реализации с помощью сети Петри-Маркова, а также имитационные модели в программной среде CPN Tools с целью получения вероятностно-временных характеристик в виде времен выполнения каждой атакой вредоносных функций.

В дальнейших исследованиях предложенные модели рассмотренных типовых сетевых атак планируется использовать в качестве основы для анализа и разработки моделей противодействия угрозам удаленного НСД к информационному ресурсу защищенных АС ОВД, а также для проведения количественной оценки опасности реализации сетевых атак на конфиденциальный информационный ресурс и количественной оценки эффективности функционирования программных средств и систем ИБ в защищенных АС на объектах информатизации ОВД в соответствии с требованиями действующей нормативной документации [1, 2, 18-21].

Полученные результаты могут быть использованы для формирования частной модели актуальных атак для конкретной АС ОВД и обоснования количественных требований к перспективным СЗИ от НСД при их эксплуатации на объектах информатизации ОВД в рамках концепции обеспечения ИБ ОВД РФ[2].

Библиографический список:

1. ФСТЭК России. Руководящий документ. Концепция защиты средств вычислительной техники и автоматизированных систем от несанкционированного доступа к информации [Электронный ресурс]. Режим до-

- ступа: <https://fstec.ru/component/attachments/download/299>. (Дата обращения: 15.05.2020).
2. Об утверждении Концепции обеспечения информационной безопасности органов внутренних дел Российской Федерации до 2020 года: приказ МВД России от 14.03.2012 № 169 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://police magazine.ru/forum/showthread.php?t=3663>. (Дата обращения: 15.05.2020).
 3. Рогозин Е.А. Проблемы и пути их решения при проектировании систем защиты информации от несанкционированного доступа в автоматизированных информационных системах ОВД / Е.А. Рогозин, А.Д. Попов, Т.В. Мещерякова // Информационные технологии, связь и защита информации МВД России. 2017. Ч. 1. С. 115-118.
 4. Butusov I.V. Methodology of Security Assessment Automated Systems as Objects Critical Information Infrastructure / I.V. Butusov, A.A. Romanov [Электронный ресурс]. с Режим доступа: http://fcyber.ru/wp-content/uploads/2018/05/02-10-125-18_1.Butusov.pdf. (Дата обращения: 17.05.2020).
 5. Дровникова И.Г. Анализ существующих способов и процедур оценки опасности реализации сетевых атак в автоматизированных системах органов внутренних дел и аспекты их совершенствования / И.Г. Дровникова, Е.С. Овчинникова, Е.А. Рогозин // Вестник Воронежского университета МВД России. 2019. № 4. С. 51-63.
 6. Sher A. Simulation of Attacks in a Wireless Sensor Network using NS2 / A. Sher // The School of Engineering & Computing Sciences. Texas A&M University-Corpus Christi. Spring 2015. 49 p.
 7. Yuanshun Y. Automated Crowdturfing Attacks and Defenses in Online Review Systems / Y. Yuanshun [etc.] // arXiv:1708.08151v2 [cs.CR]. 8 Sep. 2017. 16 p. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://docviewer.yandex.ru/view/> (Дата обращения: 17.05.2020).
 8. Kresimir S. The information systems' security level assessment model based on an ontology and evidential reasoning approach / S. Kresimir, O. Hrvoje, G. Marin // Computers & Security. 2015. pp. 100-112.
 9. Effectiveness Evaluation on Cyberspace Security Defense System / L. Yun [etc.] // International Conference on Network and Information Systems for Computers (IEEE Conference Publications). 2015. pp. 576-579.
 10. Радько Н.М. Риск-модели информационно-телекоммуникационных систем при реализации угроз удаленного и непосредственного доступа / Н.М. Радько, И.О. Скобелев. М: РадиоСофт, 2010. 232 с.
 11. Радько Н.М. Проникновения в операционную среду компьютера: модели злоумышленного удаленного доступа / Н.М. Радько, Ю.К. Язов, Н.Н. Корнеева. Воронеж: Воронеж. госуд. технич. ун-т, 2013. 265 с.
 12. ФСТЭК России. Банк данных угроз безопасности информации. Режим доступа: <https://bdu.fstec.ru/threat>. (Дата обращения: 16.05.2020).
 13. Овчинникова Е.С. Анализ и классификация основных угроз информационной безопасности автоматизированных систем на объектах информатизации органов внутренних дел / А.В. Бацких, И.Г. Дровникова, Е.С. Овчинникова, Е.А. Рогозин // Безопасность информационных технологий = IT Security. Т. 27. № 1. 2020. С. 40-50.
 14. Овчинникова Е.С. Анализ типовых сетевых атак на автоматизированные системы органов внутренних дел / И.Г. Дровникова, Е.С. Овчинникова, В.В. Конобеевских // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. Т. 47. № 1. 2020. С. 72-85.
 15. Свами М. Графы, сети и алгоритмы: пер. с англ. / М. Свами, К. Тхуласираман. Москва: Мир, 1984. 455 с.
 16. Дистель Р. Теория графов / Р. Дистель. Новосибирск: изд-во ин-та математики, 2002. 336 с.
 17. Sudakov V. Graph Theory / V. Sudakov. 18.08.2016 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://legalacts.ru/doc/FZ-ob-informacii-informacionnyh-tehnologijah-i-o-zawite-informacii>. (Дата обращения: 15.05.2020).
 18. Об информации, информационных технологиях и о защите информации: федеральный закон от 27.07.2006 № 149-ФЗ (в ред. от 19.12.2016) (с изм. и доп., вступ. в силу с 13.12.2019) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://legalacts.ru/doc/FZ-ob-informacii-informacionnyh-tehnologijah-i-o-zawite-informacii>. (Дата обращения: 17.05.2020).
 19. Об утверждении Доктрины информационной безопасности Российской Федерации: указ Президента РФ от 05.12.2016, №646 [Электронный ресурс]. Режим доступа: (Дата обращения: 18.05.2020): <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201612060002>.
 20. ГОСТ Р 51583-2014. Национальный стандарт Российской Федерации. Защита информации. Порядок создания автоматизированных систем в защищенном исполнении. Общие положения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200108858>. (Дата обращения: 18.05.2020).
 21. ФСТЭК России. Руководящий документ. Временное положение по организации разработки, изготовления и эксплуатации программных и технических средств защиты информации от несанкционированного доступа в автоматизированных системах и средствах вычислительной техники [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/901817221>. (Дата обращения: 18.05.2020).

References:

1. FSTEC Rossii. Rukovodyashchiy dokument. Kontseptsiya zashchity sredstv vychislitel'noy tekhniki i avtomatizirovannykh sistem ot nesanktsionirovannogo dostupa k informatsii [Elektronnyy resurs]. [FSTEC of

- Russia. Guidance document. The concept of protection of computer technology and automated systems from unauthorized access to information [Electronic resource]. Access mode: [https://fstec.ru/component/ attachments / download / 299](https://fstec.ru/component/attachments/download/299). - (Date of treatment: 05/15/2020). (In Russ)]
2. Ob utverzhdenii Kontseptsii obespecheniya informatsionnoy bezopasnosti organov vnutrennikh del Rossiyskoy Federatsii do 2020 goda: prikaz MVD Rossii ot 14.03.2012 № 169 [Elektronnyy resurs]. [On the approval of the Concept for ensuring information security of the internal affairs bodies of the Russian Federation until 2020: order of the Ministry of Internal Affairs of Russia dated March 14, 2012 No. 169 [Electronic resource]. Access mode: <http://policemagazine.ru/forum/showthread.php?t=3663>. (Date of treatment: 05/15/2020). (In Russ)]
 3. Rogozin Ye.A. Problemy i puti ikh resheniya pri proyektirovanii sistem zashchity informatsii ot nesanktsionirovannogo dostupa v avtomatizirovannykh informatsionnykh sistemakh OVD / Ye.A. Rogozin, A.D. Popov, T.V. Meshcheryakova // Informatsionnyye tekhnologii, svyaz' i zashchita informatsii MVD Rossii. 2017. CH. 1. S. 115-118. [Rogozin E.A. Problems and ways to solve them in the design of information protection systems from unauthorized access in automated information systems of the internal affairs department / E.A. Rogozin, A.D. Popov, T.V. Meshcheryakova // Information technologies, communication and information protection of the Ministry of Internal Affairs of Russia. 2017. Part 1. pp. 115-118. (In Russ)]
 4. Butusov I.V. Methodology of Security Assessment Automated Systems as Objects Critical Information Infrastructure / I.V. Butusov, A.A. Romanov [Electronic resource]. Access mode: [http://fcberrus.com/wp-content/uploads/2018/05/02-10-125-18_1. Butusov. pd](http://fcberrus.com/wp-content/uploads/2018/05/02-10-125-18_1.Butusov.pdf). (Date of treatment: 05/17/2020).
 5. Drovnikova I.G. Analiz sushchestvuyushchikh sposobov i protsedur otsenki opasnosti realizatsii setevykh atak v avtomatizirovannykh sistemakh organov vnutrennikh del i aspekty ikh sovershenstvovaniya / I.G. Drovnikova, Ye.S. Ovchinnikova, Ye.A. Rogozin // Vestnik Voronezh. in-ta MVD Rossii. 2019. № 4. S. 51-63. [Drovnikova I.G. Analysis of existing methods and procedures for assessing the danger of implementing network attacks in automated systems of internal affairs bodies and aspects of their improvement / I.G. Drovnikova, E.S. Ovchinnikova, E.A. Rogozin // Bulletin Voronezh. Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia. 2019.No. 4.pp. 51-63. (In Russ)]
 6. Sher A. Simulation of Attacks in a Wireless Sensor Network using NS2 / A. Sher // The School of Engineering & Computing Sciences. –Texas A&M University-Corpus Christi. Spring 2015. 49 p.
 7. Yuanshun Y. Automated Crowdturfing Attacks and Defenses in Online Review Systems / Y. Yuanshun [etc.] // arXiv:1708.08151v2 [cs.CR]. 8 Sep. 2017. 16 p. [Elektronnyy resurs]. [Yuanshun Y. Automated Crowdturfing Attacks and Defenses in Online Review Systems / Y. Yuanshun [etc.] // arXiv: 1708.08151v2 [cs.CR]. 8 Sep. 2017.16 p. [Electronic resource]. Access mode: <https://docviewer.yandex.ru/view/> (Date of access: 17.05.2020). (In Russ)]
 8. Kresimir S. The information systems' security level assessment model based on an ontology and evidential reasoning approach / S. Kresimir, O. Hrvoje, G. Marin // Computers & Security. 2015. 100-112.
 9. Effectiveness Evaluation on Cyberspace Security Defense System / L. Yun [etc.] // International Conference on Network and Information Systems for Computers (IEEE Conference Publications). 2015. 576-579.
 10. Rad'ko N.M. Risk-modeli informatsionno-telekommunikatsionnykh sistem pri realizatsii ugroz udalennogo i neposredstvennogo dostupa / N.M. Rad'ko, I.O. Skobelev. M: RadioSoft, 2010. 232 s. [Radko N.M. Risk-models of information and telecommunication systems in the implementation of threats of remote and direct access / N.M. Radko, I.O. Skobelev. M: RadioSoft, 2010.232 p. (In Russ)]
 11. Rad'ko N.M. Proniknoveniya v operatsionnuyu sredu komp'yutera: modeli zloumyshlennogo udalennogo dostupa / N.M. Rad'ko, YU.K. YAZov, N.N. Korneyeva. Voronezh: Voronezh. gosud. tekhnich. un-t, 2013. 265 s. [Radko N.M. Penetration into the operating environment of a computer: models of malicious remote access / N.M. Radko, Yu.K. Yazov, N.N. Korneeva. Voronezh: Voronezh. state technical un-t, 2013. 265 p. (In Russ)]
 12. FSTEC Rossii. Bank dannykh ugroz bezopasnosti informatsii. Rezhim dostupa: <https://bdu.fstec.ru/threat>. (Data obrashcheniya: 16.05.2020). [FSTEC of Russia. Databank of information security threats. Access mode: <https://bdu.fstec.ru/threat>. (Date of treatment: 16.05.2020). (In Russ)]
 13. Ovchinnikova Ye.S. Analiz i klassifikatsiya osnovnykh ugroz informatsionnoy bezopasnosti avtomatizirovannykh sistem na ob'yektakh informatizatsii organov vnutrennikh del / A.V. Batskikh, I.G. Drovnikova, Ye.S. Ovchinnikova, Ye.A. Rogozin // Bezopasnost' informatsionnykh tekhnologiy = IT Security. T. 27. № 1. 2020. S. 40-50. [Ovchinnikova E.S. Analysis and classification of the main threats to the information security of automated systems at the objects of informatization of the internal affairs bodies / A.V. Batskikh, I. G. Drovnikova, E.S. Ovchinnikova, E.A. Rogozin // Security of information technologies = IT Security. T. 27.No. 1. 2020.pp. 40-50. (In Russ)]
 14. Ovchinnikova Ye.S. Analiz tipovykh setevykh atak na avtomatizirovannyye sistemy organov vnutrennikh del / I.G. Drovnikova, Ye.S. Ovchinnikova, V.V. Konobeyevskikh //Vestnik Dagestanskogo gosud. tekhnich. universiteta. Tekhnicheskkiye nauki. T. 47. № 1. 2020. S. 72-85. [Ovchinnikova E.S. Analysis of typical network attacks on automated systems of internal affairs bodies / I.G. Drovnikova, E.S. Ovchinnikova, V.V. Konobeevskikh // Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science. T. 47. No. 1. 2020. pp. 72-85. (In Russ)]

15. Svami M. Grafy, seti i algoritmy: per. s angl. / M. Svami, K. Tkhulasiraman. Moskva: Mir, 1984. 455 s. [Swami M. Graphs, networks and algorithms: trans. from English / M. Swami, K. Thulasiraman. Moscow: Mir, 1984 455 p. (In Russ)]
16. Distel' R. Teoriya grafov / R. Distel'. Novosibirsk: izd-vo in-ta matematiki, 2002. 336 s. [Distel R. Graph Theory / R. Distel. Novosibirsk: publishing house of the Institute of Mathematics, 2002.336 p. (In Russ)]
17. Sudakov B. Graph Theory / B. Sudakov. 08/18/2016 [Electronic resource]. Access mode: <https://legalacts.ru/doc/FZ-ob-informacii-informacionnyh-tehnologijah-i-o-zawite-informacii>. (Date of access: 15.05.2020).
18. Ob informatsii, informatsionnykh tekhnologiyakh i o zashchite informatsii: federal'nyy zakon ot 27.07.2006 № 149-FZ (v red. ot 19.12.2016) (s izm. i dop., vstup. v silu s 13.12.2019) [Elektronnyy resurs]. – Rezhim dostupa: <https://legalacts.ru/doc/FZ-ob-informacii-informacionnyh-tehnologijah-i-o-zawite-informacii>. – (Data obrashcheniya: 17.05.2020). [On information, information technologies and information protection: Federal Law No. 149-FZ of July 27, 2006 (as amended on December 19, 2016) (as amended and supplemented, entered into force on December 13, 2019) [Electronic resource]. Access mode: <https://legalacts.ru/doc/FZ-ob-informacii-informacionnyh-tehnologijah-i-o-zawite-informacii>. (Date of treatment: 05/17/2020). (In Russ)]
19. Ob utverzhdenii Doktriny informatsionnoy bezopasnosti Rossiyskoy Federatsii: ukaz Prezidenta RF ot 05.12.2016, №646 [Elektronnyy resurs]. [On the approval of the Doctrine of information security of the Russian Federation: decree of the President of the Russian Federation of 05.12.2016 No. 646 [Electronic resource]. Access mode: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201612060002>. (Date of access: 05/18/2020). (In Russ)]
20. GOST R 51583-2014. Natsional'nyy standart Rossiyskoy Federatsii. Zashchita informatsii. Poryadok sozdaniya avtomatizirovannykh sistem v zashchishchennom ispolnenii. Obshchiye polozheniya [Elektronnyy resurs] [GOST R 51583-2014. National standard of the Russian Federation. Protection of information. The procedure for creating automated systems in a protected design. General provisions [Electronic resource]. Access mode: <http://docs.cntd.ru/document/1200108858>. (Date of access: 05/18/2020). (In Russ)]
21. FSTEK Rossii Rukovodyashchiy dokument. Vremennoye polozheniye po organizatsii razrabotki, izgotovleniya i ekspluatatsii programmnykh i tekhnicheskikh sredstv zashchity informatsii ot nesanktsionirovannogo dostupa v avtomatizirovannykh sistemakh i sredstvakh vychislitel'noy tekhniki [FSTEK of Russia. Guidance document. Temporary regulations on the organization of development, manufacture and operation of software and technical means of protecting information from unauthorized access in automated systems and computer facilities [Electronic resource] (In Russ)]

Сведения об авторе:

Овчинникова Елена Сергеевна, адъюнкт кафедры автоматизированных информационных систем органов внутренних дел; e-mail.ru:yelena_ovchinnikova1@mail.ru

Information about authors:

Elena S. Ovchinnikova, Adjunct, Department of Automated Information Systems of the Internal Affairs Bodies; e-mail.ru:yelena_ovchinnikova1@mail.ru

Конфликт интересов.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 01.12.2020.

Принята в печать 15.01.2021.

Conflict of interest.

The author declare no conflict of interest.

Received 01.12. 2020.

Accepted for publication 15.01.2021.

Для цитирования: А.Л.Большеротов. Модель комплексной системы экологической безопасности строительства. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2021;48(1):130-140. DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-1-130-140

For citation: A.L. Bolsherotov. Model of an integrated environmental safety system for construction. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2021; 48(1):130-140. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-1-130-140

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 626.862.7

DOI: 10.21822/2073-6185-2021-48-1-130-140

МОДЕЛЬ КОМПЛЕКСНОЙ СИСТЕМЫ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ СТРОИТЕЛЬСТВА

А.Л. Большеротов

Гродненский государственный университет имени Янки Купалы,
230023, г. Гродно, ул. Ожешко, 22, Беларусь

Резюме. Цель. С каждым годом всё большее значение приобретают проблемы экологии. Эксперты прогнозируют не более 10 лет достижения точки не возврата, когда экологические проблемы перейдут в фазу неуправляемого хаоса. Чаще всего катастрофические изменения связывают с потеплением климата из-за парниковых выбросов в атмосферу промышленности и транспорта. Однако первопричиной всего, как установили исследования Слесарева М.Ю., Гутенева В.В. и др. авторов, является строительная отрасль, это основной источник экологических проблем. Особенно проблема экологической безопасности касается городов и крупных населённых пунктов. Проведёнными исследованиями было установлено, что уровень экологической безопасности определяется, как сумма воздействий строительных объектов на единицу площади селитебной территории. Для объективной оценки экологической безопасности рассматривались загрязнение окружающей среды, воздействия на неё различных факторов, а также возникающий эффект опосредованного воздействия строительных объектов на окружающую среду. **Метод.** Применены новые концептуальные подходы и принципы в оценке экологической безопасности строительных объектов и территорий, учитывающие существующую экологическую обстановку застраиваемых территорий, что делает проблему экологической безопасности управляемой, и обеспечивает современным и будущим поколениям здоровье, комфортабельную окружающую среду и здоровье. **Результат.** В результате моделирования процессов за интегрирующее понятие экологической безопасности территории принят коэффициент «степень концентрации недвижимости», введены понятия «экологический резерв», «порог экологической безопасности», «диапазон устойчивого состояния». Для оценки диапазона устойчивого состояния окружающей среды – величины колебания размера экологического резерва в зависимости от климатических условий, времени дня, недели, года, введено понятие коэффициента устойчивости ($k_{уст}$), разработана методика расчёта этого коэффициента. В результате получены численные значения вышеуказанных показателей для исследуемых территорий. В качестве основного документа, отражающего состояние экологической безопасности строительного объекта, предложена разработка экологического паспорта объекта и экологический паспорт территорий. Для создания экологического паспорта разработана и обоснована структура экологической безопасности, в которую вошли четыре основных блока: внешняя экологическая безопасность, внутренняя экологическая безопасность, энергоэффективность и автономность объекта (территории). **Вывод.** Предложенный подход к оценке экологической безопасности позволяет достоверно оценивать возможности территорий по размещению строительных объектов с различным техногенным потенциалом, планировать мероприятия по обеспечению диапазона устойчивого состояния территорий, что в итоге обеспечивает качество жизни и здоровья населения, комфортную и безопасную окружающую среду селитебных территорий, а также сохранение живой природы.

Ключевые слова: экспертиза строительства, экологический паспорт территорий, экологическая безопасность, степень концентрации недвижимости, экологический резерв, порог экологической безопасности

MODEL OF AN INTEGRATED ENVIRONMENTAL SAFETY SYSTEM FOR CONSTRUCTION

A.L. Bolsherotov

Janka Kupala State University of Grodno,
22 Ozheshko St., Grodno 230023, Belarus

Abstract. Objective. Every year, environmental issues are becoming more and more critical. Experts predict no more than ten years of reaching the point of no return when environmental problems will move into a phase of uncontrolled chaos. Most often, catastrophic changes are associated with climate warming due to greenhouse gas emissions from industry and transport. However, the root cause of everything, as established in the research by Slesarev et al., is the construction industry as the primary source of environmental problems. The problem of environmental safety especially concerns cities and large settlements. The conducted research has established that environmental safety is determined as the sum of the impacts of construction projects on a unit area of residential territory. For an objective assessment of environmental safety, environmental pollution, the impact of various factors, and the resulting effect of the indirect impact of construction projects on the environment were considered. **Methods.** New conceptual approaches and principles were applied in assessing the environmental safety of construction sites and territories, taking into account the current environmental status of the built-up areas, which makes the problem of environmental safety manageable, and provides modern and future generations with health, a comfortable environment, and health. **Results.** As a result of process modeling, the "real estate concentration degree" ratio was adopted as an integrating concept of environmental safety of the area, and the concepts of "environmental reserve," "environmental safety threshold," and "sustainable state range" were introduced. The stability ratio concept (r_{stab}) is introduced, a method for calculating this ratio is developed to assess the range of the sustainable environment state – the magnitude of the variation in the size of the ecological reserve depending on climatic conditions, time of day, week, year. As a result, the numerical values of the above-mentioned indicators for the studied areas are obtained. As the main document reflecting the state of the environmental safety of the construction object, the development of the environmental facility certificate and the environmental area certificate is proposed. To create an environmental certificate, the structure of environmental safety has been developed and justified, which includes four main blocks: external environmental safety, internal environmental safety, energy efficiency, and autonomy of the facility (area).

Conclusion. The proposed approach to the assessment of environmental safety makes it possible to reliably assess the possibilities of areas for the placement of construction projects with various industry-related potential, plan measures to ensure a range of sustainable conditions of the areas, which ultimately ensures the quality of life and health of the population, a comfortable and safe environment of residential areas, as well as the wild-life preservation.

Keywords: construction expertise, environmental area certificate, ecological safety, real estate concentration degree, ecological reserve, ecological safety threshold

Введение. Необходимость объективной оценки экологической безопасности крайне актуальна при быстро растущей автомобилизации и перегруженности городов автотранспортом, как одного из факторов экологической безопасности, влияющего на качество жизни и здоровье населения. Созданию предпосылок комплексной оценки экологической безопасности посвящены труды Графкиной М.В., Слесарева М.Ю., Колчигина М.А. и других учёных. В 2000-х годах были проведены глобальные экспериментальные работы по созданию методики и модели комплексной оценки экологической безопасности строительства. Исследования проводились в крупнейших и самых проблемных, с экологической точки зрения городах страны, таких как Москва, Волгоград, Курск, Новокузнецк и др. В результате можно обобщить некоторые полученные предварительные результаты.

Постановка задачи. Целью исследования является создание модели комплексной системы экологической безопасности строительства, задача исследования – разработать инструментальной оценки.

Методы исследования. Весь жизненный цикл строительного объекта – объекта недвижимости от проектирования до ликвидации объекта связан с прямым и опосредованным воздействием на окружающую среду – на человека, на природу.

Без воздействия на окружающую среду строительство и эксплуатация объекта недвижимости, независимо от его величины и места его расположения – на земле, под землёй, под водой или над землёй, в том числе в космосе, не обходится [1].

Следует отметить, что любой строительный объект является объектом недвижимости. Эти два понятия синонимы. Но понятие недвижимость значительно шире и помимо строительных объектов - любых зданий и сооружений без исключения, к недвижимости относятся территории, акватории, а также речные и морские суда, любые летающие объекты, в том числе космические аппараты, механизмы, на борту которых действует юрисдикция государства приписки этих объектов, механизмов или аппаратов.

Для обеспечения качества жизни и здоровья населения, а также сохранения живой природы, согласно Экологической доктрине РФ [2] необходимо обеспечить должную оценку экологической безопасности строительных объектов и территорий застройки.

Вопросы оценки экологической безопасности объектов строительства периодически рассматриваются в научной литературе. Как правило, оценивается техногенное воздействие строительного объекта на разных этапах строительства или в процессе его эксплуатации [3]. До сих пор в практике строительного проектирования при оценке воздействия строительного объекта на окружающую среду (раздел проекта ОВОС), рассматривается только техногенная нагрузка на территорию и не учитывается существующее состояние экологического загрязнения планируемой к застройке территории. В результате загрязнение окружающей среды в промышленных городах превышает норму во много раз, что отрицательно сказывается на качестве жизни и здоровье населения.

В данной работе даны новые концептуальные подходы и принципы в оценке экологической безопасности строительных объектов и территорий, учитывающие существующую экологическую обстановку застраиваемых территорий, что делает проблему экологической безопасности управляемой, и обеспечивает современным и будущим поколениям здоровье, комфортабельную окружающую среду и здоровье.

Уже на этапе *проектирования строительного объекта* в проект закладывается определённое воздействие на окружающую среду в период строительства и эксплуатации данного объекта. Каждый этап строительства имеет свой спектр негативных воздействий на окружающую среду.

По значимости и объёму воздействия эти этапы неравноценны. Так, во время *этапа строительства объекта*, когда расчищается площадка под объект, прокладываются подземные коммуникации, транспортные пути и непосредственно возводится объект, идёт прямое воздействие на окружающую среду. Например, при прокладке коммуникаций уничтожается растительность, нарушается гидрогеологический баланс почвы [4]. Понижение уровня грунтовых вод, приводит к гибели близлежащих лесных массивов, особенно взрослых вековых деревьев, у которых корневая система уже не развивается и не может выжить при изменении привычного уровня питающих подземных вод [5].

Этап жизненного цикла объекта недвижимости – *эксплуатация*, в зависимости от назначения объекта, имеет разный потенциал воздействия на окружающую среду.

Жилые строения, объекты рекреации, социальной сферы, институциональные объекты, не связанные с производством, вполне умеренно воздействуют на окружающую среду. Хотя критерий «умеренный» в разных условиях размещения этих объектов достаточно условен. К примеру, место отдыха и развлечений – шумный ночной клуб, может наносить больше вреда жителям соседних жилых домов, чем всё остальное окружение жилого массива.

Здания производственного назначения, как правило, являются основным источником экологических проблем. Это выбросы в атмосферу пыли и газов из дымящих труб, это забор и оборот воды для производственных нужд, это шум от производства и обслуживающего транспорта, отходы производства, сброс технических вод. Опосредованно производственный объект воздействует на окружающую среду в *местах получения сырья* для своего производства [6],

вблизи *транспортных магистралей* по которым доставляется сырьё или перевозится готовая продукция.

Поэтому, воздействие любого объекта недвижимости на окружающую среду, особенно производственного, должно рассматриваться в комплексе, системно [7]. Системный анализ – метод управления и оценки, позволяет это сделать с достаточно высокой долей достоверности [8].

Практика планирования, проектирования строительного объекта в настоящее время, как правило, ограничивается *оценкой воздействия на окружающую среду конкретного объекта в конкретном месте, не учитывая прямое и опосредованное его воздействие* в места производства сырья, при транспортировке, сопутствующей инфраструктуры, которая обязательно появляется при строительстве основного градообразующего объекта [9].

Строительство жилого дома обязательно сопровождается подведением к нему транспортных коммуникаций, строительством парковок или паркингов, бойлерных, трансформаторных подстанций, линий электропередач, оборудования и антенн высокочастотного излучения для средств связи, строительством остановок транспорта, где наблюдается максимальное загрязнение окружающей среды во всех средах от остановившегося работающего транспорта. И вот в сумме воздействий на окружающую среду от всех сопутствующих объектов, тихий жилой дом превращается в объект повышенной экологической опасности.

Особенно актуальна сейчас проблема перенасыщения селитебных территорий автотранспортом. Мало того, что игнорирование при проектировании жилых домов фактора роста количества личного автотранспорта превращает дворы в бесконечную автостоянку и двор перестаёт быть местом отдыха жителей, местом общения, прогулок, спорта, так припаркованный у дома автотранспорт превращается в крайне опасный источник загрязнения окружающей среды.

Известно, что в отработанных газах автомобилей обнаружено около 200 различных ядовитых химических субстанций. Отсюда доля автотранспорта в загрязнении окружающей среды, особенно в городах, многократно превышает загрязнение от промышленных объектов. Так в г. Москве (Российская Федерация) доля загрязнения от автотранспорта атмосферы составляет более 93%, почвы 99,99%, воды 98% (данные исследований автора). В г. Гродно, в одном из самых экологически чистых городов Республики Беларусь, загрязнение автотранспортом атмосферы составляет около 78%, остальное даёт промышленность города. В Минске, столице Беларуси, загрязнение атмосферы автотранспортом оценивается в 80%. Но это только поверхностные расчёты и замеры некоторых загрязнителей.

Кроме загрязняющих газов есть ещё пыль. Пыль, это не только бытовая гигиеническая навязчивая проблема, но и источник серьёзных заболеваний. Особое значение для здоровья имеют частицы размером 10 и 2,5 нанометра (PM10, PM2,5) [10]. Эти показатели запылённости атмосферы нормируются и отслеживаются в западных странах, но в наших странах бывшего СССР, эти показатели системно не отслеживаются, в связи с отсутствием возможности их регулирования и отсутствием нужного фильтрующего оборудования на производствах. Опасность пыли заключается именно в нано размерах частиц [11]. Частички пыли в 2,5 nm всего в 25 раз больше молекулы водорода. Это позволяем им на нано уровне создавать в лёгких человека прочные связи. Альвеолы лёгких постепенно заполняются скоксовавшейся пылью, в результате чего у человека развиваются тяжёлые заболевания типа силикоз, силикотуберкулёз, пылевой бронхит и другие. В строительстве наиболее пыльные процессы, это пескоструйные работы, работы по разборке строительных конструкций, производство строительных материалов, особенно цемента.

При очень высокой концентрации пыль становится видимой и приобретает вид смога. Но даже не видимый уровень концентрации пыли при большом количестве автотранспорта может превышать нормативы загрязнения атмосферы пылью в десятки раз. Так замеры, проводимые в г. Новокузнецке, в одном из самых экологически неблагополучных городов Российской Федерации показали, что превышение норматива загрязнения воздуха пылью составляет

несколько десятков раз (до 600 при норме 25), а содержание вредных газов в атмосфере города превышает предельно допустимую норму концентрации (ПДК) в 240 (!) раз в районе алюминиевого и ферросплавного металлургических заводов [12], находящихся в черте города (данные исследований автора в 2011 году). Но внешне воздух в городе прозрачен, деревья зелёные, солнце яркое, город красив и благополучен. Однако такое обманчивое благополучие привело к тому, что в Новокузнецке отмечается высокий уровень онкологических заболеваний, и низкая средняя продолжительность жизни, которая в 90-е годы прошлого века упала до рекордных 49 лет у мужчин [13-15].

Поэтому внешнее благополучие экологической обстановки в городах может скрывать большие уже существующие проблемы и задача научного сообщества выявить проблемы и предложить их решение, не перекладывая на будущие поколения.

Конференция ООН по окружающей среде и развитию [16] определила основные приоритеты устойчивого развития общества с точки зрения обеспечения экологической безопасности, к ним относятся: **обеспечение качества жизни, здоровья населения и сохранение живой природы**. Эти же положения отражены и в Экологической доктрине Российской Федерации, в документах стран СНГ [2].

Факторы, влияющие на качество жизни, здоровье население и живую природу крайне разнообразны. Практически любая сторона жизни современного общества отражается на экологической безопасности и экологической обстановке. Это и состояние медицины, и политика, и экономика, и загрязнения окружающей среды [17].

Все факторы можно разделить на две большие группы, это **воздействующие и загрязняющие факторы** плюс **опосредованное воздействие** на окружающую среду, о котором говорилось выше.

Для комплексной оценки экологической безопасности следует выделить **приоритетный фактор**, наиболее актуальный в данное время в данном месте необходимо [18].

Для естественной экосистемы, для **животного мира** живой природы крайне важно, приоритетно сохранение **биотопа** обитания каждого вида животных. Сохранение биотопа – **основной фактор** экологической безопасности естественной экосистемы. Биотоп, это минимальная площадь живой природы, необходимая для нормального питания и проживания данного вида животных. Однако и размер биотопа не всегда определяет условия сохранения в нём вида животного, если условия пребывания на этой территории для животного не комфортные. Достаточно рядом с территорией обитания животных проложит шумную магистраль или построить даже небольшой объект строительства, и биотоп сразу сократится за счёт образовавшейся зоны отчуждения вдоль дороги или объекта недвижимости. Ещё более серьёзные последствия для биотопа естественной экосистемы возникают, когда через природную территорию обитания животных прокладывается транспортная магистраль.

В этом случае биотоп разрушается практически полностью. Так случилось при прокладке Московской кольцевой автомобильной дороги через природный лесной массив Лосиный остров в Москве. Абсолютно, казалось бы, безопасный источник возобновляемой энергии – ветрогенератор промышленной мощности с лопастями 10 м в диаметре, имеет зону отчуждения более километра [19].

Проектирование строительства и возведение объектов без учёта этих факторов наносит существенный ущерб живой природе, даже не спилив ни одного дерева и не разорив ни одного гнезда на территории застройки.

Для человека – части живой природы, также существует условный биотоп, который необходим для нормальной жизни и воспроизводства населения – его искусственная экосистема обитания. Но человек социализированное духовное создание, поэтому для нормальной жизни ему нужно не только питание и условия для воспроизводства. Человеку нужно качество жизни, которое в свою очередь обеспечивает здоровье [20].

Загрязнение окружающей среды, даже если оно не ощущается человеком, напрямую отрицательно сказывается на его здоровье.

Поэтому, для выявления загрязнений в местах обитания человека, необходим перманентный экологический мониторинг – необходимы технические средства и методы оценки загрязнения, необходимы методики комплексного учёта воздействия на окружающую среду загрязняющих и воздействующих экологических факторов [21, 22].

Кроме того, комплекс различных факторов, как выяснилось, в сумме эмерджентен, то есть каждый фактор сам по себе вполне безобиден для человека и окружающей среды, но в комплексе взаимодействия эти факторы создают неблагоприятные условия для человека, снижают качество его жизни и отражаются негативно на здоровье.

Поэтому, при комплексной оценке экологической безопасности необходимо учитывать и фактор эмерджентности. Модели, методики оценки эмерджентного воздействия на окружающую среду должны разрабатываться для разных условий и совокупностей факторов, на сегодняшний день такие модели только формируются и массового использования при оценке экологической безопасности не имеют. Комплексным подходом к оценке экологической безопасности в достаточной степени не занимаются ни в России, ни в Беларуси, ни в одной стране мира.

Вся оценка, где она есть, сводится к инструментальному измерению загрязняющих факторов, к прогнозированию и моделированию, к техническим расчётам воздействий, чего на сегодняшний день недостаточно. Регулярная профессиональная служба экологического мониторинга создана в России только в Москве и частично в Санкт-Петербурге. Но и в этих крупнейших мегаполисах служба экомониторинга выполняет в основном оценку загрязнения атмосферы по нескольким газам и химическим веществам. Скорее эти службы выполняют локальный мониторинг крайне ограниченной территории вокруг экологической станции. В Москве таких стационарных станций всего 44 на 120 районов Москвы. И ещё 7 станций размещено на территории, так называемой новой Москвы. Общая площадь территории мониторинга в Москве 2561,5 км² или 1 станция на 49,3 км². В крупнейшем Северо-Восточном округе Москвы площадью 101 км², где проживает 1 млн. 432 тыс. человек всего 2(!) станции. В Москве около 150 рек и 240 открытых водоёмов, но непрерывный контроль качества воды осуществляется только несколькими станциями на Москве-реке и в месте слияния реки Яуза с Москвой-рекой.

В такой ситуации говорить о достоверном экологическом мониторинге территории не приходится. Мониторинг стационарными станциями и несколькими передвижными на базе микроавтобусов, которые есть в арсенале Мосэкомониторинга, не достаточен для мегаполиса, нужна другая модель оценки экологической безопасности. А вовлечение общественности в экомониторинг, как это сделано в Беларуси при финансовой поддержке ЕС в 2018 году, скорее нужно отнести к экологическому воспитанию населения, но не к решению экологической проблемы. Для решения нужен профессиональный подход [23].

Обсуждение результатов. Одним из важнейших шагов в оценке и обеспечении экологической безопасности является создание *экологического паспорта* территории, населённого пункта.

На практике сегодня ограничиваются *экологическим паспортом предприятия*, в котором отражается уровень загрязнения окружающей среды данным предприятием в процессе его производственной деятельности. Однако, в экологическом паспорте предприятия никак не учитывается общая экологическая обстановка территории, где находится предприятие. Поэтому в экологически неблагополучных городах, типа Новокузнецка, Норильска, Магнитогорска, Череповца и других, где сейчас экологические условия не совместимы с необходимым качеством жизни человека и не обеспечивают ему здоровье, продолжают проектироваться и строиться жилые дома, школы, больницы, спортивные сооружения и все эти важные для человека строительные объекты благополучно проходят экологическую экспертизу на стадии проектирования, т.к. они условно безопасны.

А вот небезопасность места (территории) для их строительства никак не учитывается при экспертизе и правильней было бы вместо нового строительства в таких городах озаботить-

ся мерами по улучшению экологической обстановки и переселению людей в экологические чистые места, если нельзя закрыть или реконструировать загрязняющие предприятия.

Экологический паспорт территории, это основа градостроительной политики городов, обеспечивающая качество жизни, здоровье населения и сохранение живой природы населённых пунктов.

Экологический паспорт позволяет определить проблемные, с экологической точки зрения, территории, даёт рекомендации по разрешению проблем.

В экологическом паспорте для каждой оцениваемой территории устанавливается **порог экологической безопасности** (для каждого объекта, каждой территории он свой, определяется своим составом факторов), определяется существующий **уровень загрязнения окружающей среды**, определяется **экологический резерв территории** и **диапазон устойчивого состояния**, то есть допустимый уровень отклонения показателей экологической безопасности, зависящий от временных факторов и объективной реальности функционирования инфраструктуры оцениваемой территории.

Для проектируемых и строящихся объектов показатели экологического резерва и показатели техногенного давления объекта имеют принципиальное значение при принятии решений. Если качественное и количественное воздействие на окружающую среду и человека данного объекта больше экологического резерва территории, то строительство такого объекта *не допустимо на данной территории или необходимо принять меры к снижению уровня загрязнения территории и увеличению экологического резерва, или надо принять меры к снижению вредного воздействия, проектируемого объекта, чтобы эта величина не превышала экологического резерва территории.*

Экологический резерв территории (ЭР), равен разнице между предельно-допустимой концентрацией загрязнения (ПДК) и экологическим фоном (ЭФ), Измеряется в единицах ПДК.

Экологический резерв не остаётся постоянным и меняется в течение суток, зависит от дня недели, месяца, времени года.

При планировании строительства, при проектировании объекта рассчитывается его техногенная нагрузка (ТН) – качественное и количественное воздействие на окружающую среду и человека. Если эта величина меньше или равна величине *экологического резерва территории* ($ТН \leq ЭР$), то строительство данного объекта на данной территории возможно без ущерба общей величине экологической безопасности. Сумма экологического фона и техногенной нагрузки от объекта не должна превышать ПДК в любое время суток, недели, года.

Современный экологический паспорт комплексной оценки экологической безопасности – это экологическая документация территории или населённого пункта, разделённого на выделенные для исследования площади застройки (с пешеходной доступностью в каждой точке не более 1 километра или площадью исследований, ограниченной административными границами).

Документация включает:

1. Показатели **«степени концентрации недвижимости»** – k_{sk} , рассчитанные по заданному критерию, для каждой установленной заданием на исследование единицы территории.

2. Дифференцированные **показатели загрязнения** атмосферы, воды и почвы для заданной территории населённого пункта в виде величины **экологический резерв территории**, полученные на основе инструментальных исследований территории по разработанной модели временных и территориальных критических точек.

3. Дифференцированные показатели **воздействующих** экологических факторов с оценкой их значимости априорной диаграммой рангов, проведённой по индивидуальной (для каждой территории) методики сбора данных и на основе полученного исследовательской группой массива статистических данных.

4. Модель прогнозированного **опосредованного воздействия** экологических факторов различной этиологии (для проектируемых объектов строительства).

5. Визуализированную карту, где цветом (для наглядности) отмечены территории, ранжированные по уровню экологической безопасности.

На сегодняшний день полноценного экологического паспорта не имеет ни один населённый пункт, ни одна территория.

В основе созданной методологии оценки экологической безопасности строительного объекта и селитебной территории лежит понятие **«степень концентрации недвижимости»**.

«Степень концентрации (k_{sk}), это первый, оцениваемый на предпроектной стадии строительства показатель качества окружающей среды и основной показатель строительного паспорта территории, полученный в результате проведённых исследований. Если показатель «степени концентрации» оказался больше единицы, то строительство на такой территории недопустимо.

Показатель «степени концентрации», наряду с другими показателями экологического паспорта, предложенными по результатам проведённых исследований для комплексной оценки экологической безопасности - экологическим фоном территории и экологическим резервом, является определяющим при оценке возможности нового строительства на оцениваемой территории.

Вывод. Оценка экологической безопасности объекта строительства и территории застройки является первостепенной задачей на предпроектной и проектной стадии строительства, обеспечивающей качество жизни и здоровье населения.

Важнейшим критерием оценки территорий застройки в городах и критерием расчёта «степени концентрации недвижимости» в настоящее время является обеспеченность парковочными местами жителей и организаций населённых пунктов.

Недостаток парковочных мест, это важнейший экологический фактор, который отражается на качестве жизни, превращая дворы в плохо организованную парковку, и отражается опосредованно на здоровье населения, т.к. выхлопные газы автомобилей составляют основное загрязнение окружающей среды в городах.

Оценка негативного воздействия предусматривает ранжирование факторов на основе статистических данных, экспертных оценок и других методик является основной процедурой предпроектной и проектной экспертизы. На основе главного фактора или группы основных факторов, как критерия оценки территории, автором, совместно с группой специалистов разработана методика единой экологической оценки территорий, названной **«степень концентрации недвижимости»**.

Оценка «степени концентрации недвижимости» по заданному критерию, например, по обеспеченности территории застройки парковочными местами, показывает, величину экологического резерва территории, если он есть или величину превышения нормы застройки данной территории. Такая работа была выполнена для города Москвы. По заказу города, на основе выигранного тендера на научные исследования по оценке экологической безопасности городских районов, были комплексно обследованы все 120 районов.

На основе полученных статистических данных выполнен расчёт «степени концентрации» для каждого района и города в целом. В результате проведённого исследования выяснилось, что только три района из 120 имеют экологический резерв территории и на этих территориях возможно новое строительство.

В остальных районах города отмечено превышение возможности застройки территории районов и превышении порога экологической безопасности. Превышение нормы в отдельных районах города составило более чем в 16 раз. Полученные результаты легли в основу градостроительной политики города и экологического паспорта территорий. Суммарное значение экологических показателей всех объектов недвижимости составляют показатели экологического паспорта территории.

Методика расчёта «степени концентрации недвижимости» и методика разработки экологического паспорта будут представлены в дальнейших исследованиях.

Библиографический список:

1. Введенский Р.В. Гендлер С.Г. Титова Т.С. Влияние строительства тоннелей на окружающую среду // Инженерно-строительный журнал.- 2018. -№3(79) – С.140-149.
2. Экологическая доктрина Российской Федерации Распоряжение Правительства Российской Федерации от 31 августа 2002 г. №1225-р
3. Гиясов Б.И., Леденев В.И., Матвеева И.В. Метод расчета шума при зеркально-рассеянном отражении звука // Инженерно-строительный журнал. 2018. № 1(77). С. 13–22.
4. Минченок Е.Е., Пахомова Н.А. Оценка состояния городских водных экосистем по гидробиологическим показателям// Теоретическая и прикладная экология. 2016. № 3. С. 48-55.
5. Хаширова Т.Ю., Ламердонов З.Г., Жабоев С.А., Еналдиева М.А., Тхабисимова М.М., Ламердонов К.З. Информационные технологии и математическое моделирование при проектировании берегозащитных сооружений// Экология и промышленность России. 2019. Т. 23. № 9. С. 13-17.
6. Писаренко П.В., Самойлик М.С., Плаксиенко И.Л., Колесникова Л.А. Концептуальные основы обеспечения ресурсно-экологической безопасности в регионе// Теоретическая и прикладная экология. 2019. № 2. С. 137-142.
7. Исмаилова Ш.Т. Информационно-аналитическая модель выбора методов управления по степени их влияния на эффективность производственной деятельности строительных организаций / Ш.Т. Исмаилова, В.Б. Мелехин, В.М. Хачумов//Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2017. Том 44. №3. С. 210-221.
8. Сокольская Е.В., Кочуров Б.И., Долгов Ю.А., Лобковский В.А. Многофакторная модель как основа для управления качеством окружающей среды урбанизированных территорий// Теоретическая и прикладная экология. 2018. № 2. С. 26-34.
9. Галиулин Р.В., Галиулина Р.А., Кочуров Б.И. Техногенное загрязнение окружающей среды канцерогенными веществами// Теоретическая и прикладная экология. 2015. № 2. С. 42.
10. Роева Н.Н., Воронич С.С., Зайцев Д.А., Воронич Н.С., Чернобровина А.Г. О новом способе оперативного определения мощности промышленного выброса загрязняющего вещества// Экология и промышленность России. 2019. Т. 23. № 12. С. 34-37
11. Маслова А.А., Панарин В.М., Гришаков К.В., Рыбка Н.А., Котова Е.А., Селезнева Д.А. Применение искусственных нейронных сетей для прогнозирования уровней загрязнения воздуха и водных объектов// Экология и промышленность России. 2019. Т. 23. № 8. С. 36-41.
12. Трофименко Ю.В., Чижова В.С. Обоснование мероприятий по снижению риска здоровью от загрязнения воздуха взвешенными частицами размером менее десяти микрометров (PM10) на улично-дорожной сети городов// Экология и промышленность России. 2019. Т. 23. № 7. С. 48-51.
13. Сторожев Ю.И., Злобин В.С. Перспективные решения экологических проблем алюминиевых заводов// Экология и промышленность России. 2018. Т. 22. № 12. С. 10-13.
14. Васенина И.В., Сушко В.А. Промышленная экология региона и качество жизни местного населения// Экология и промышленность России. 2018. Т. 22. № 11. С. 66-71.
15. Голик В.И., Дмитрак Ю.В., Мулухов К.К., Вернигор В.В. Пылевое загрязнение при открытой разработке месторождений// Экология и промышленность России. 2018. Т. 22. № 6. С. 30-34.
16. Рио-де-Жанейрская декларация по окружающей среде и развитию Принята Конференцией ООН по окружающей среде и развитию, Рио-де-Жанейро, 3–14 июня 1992 года [Электронный ресурс]. – 2019. – Режим доступа: https://www.un.org/ru/documents/decl_conv/declarations/riodecl.shtml - Дата доступа: 23.11.2019.
17. Тикунов В.С., Черешня О.Ю. Индекс загрязнения и индекс напряжённости экологической ситуации в регионах Российской Федерации// Теоретическая и прикладная экология. 2017. № 3. С. 34-38.
18. Мейланов И.М. Развитие форм государственной поддержки проектов промышленного строительства / И.М. Мейланов, А.М. Эсетова// Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2016. Том 42. №3. С. 220-230.
19. Шишкин Н.Д., Ильин Р.А., Атдаев Д.И. Применение экологически эффективных вертикально-осевых ветроэнергоустановок для заповедников и национальных парков юга России// Экология и промышленность России. 2019. Т. 23. № 11. С. 43-49.
20. Кальнер В.Д. Экологически ориентированная среда обитания- интегральный критерий качества жизни// Экология и промышленность России. 2019. Т. 23. № 11. С. 50-54.
21. Яблоков А.В., Левченко В.Ф., Керженцев А.С. О концепции “управляемой эволюции» как альтернативе концепции «устойчивого развития» // Теоретическая и прикладная экология. 2017. № 2. С. 4-8.
22. Сушко В.А., Бухтиярова И.Н., Зубова О.Г. Экология как фактор формирования качества жизни: методология социологического анализа// Экология и промышленность России. 2018. Т. 22. № 2. С. 58-63.
23. Большеротов А.Л., Большеротова Л.В. Существующие методы оценки загрязнения окружающей среды и воздействия на неё / А.Л. Большеротов, Л.В. Большеротова//Жилищное строительство. 2012. № 11. С. 37-41.

References:

1. Vvedenskiy R.V., Handler S.G., Titova T.S. Vliyaniye stroitel'stva tonnelej na okruzhayushchuyu sredu [Impact of tunnel construction on the environment] //Engineering and construction journal 2018. № .3 (79) С.140-149. (In Russ)
2. Ekologicheskaya doktrina Rossijskoj Federacii Rasporyazhenie Pravitel'stva Rossijskoj Federacii [Environmental Doctrine of the Russian Federation Order of the Government of the Russian Federation] of August 31, 2002 No. 1225-p. (In Russ)
3. Gyasov B.I., Ledenev V.I., Matveeva I.V. Metod rascheta shuma pri zerkal'no-rasseyannom otrazhenii zvuka [Method of calculation of noise at mirror-scattered reflection of sound] //Engineering and construction log. 2018. № 1(77). pp.13-22. (In Russ)
4. Minchenok E.E., Pakhomova N.A. Ocenka sostoyaniya gorodskih vodnyh ekosistem po gidrobiologicheskim pokazatelyam [Assessment of the state of urban aquatic ecosystems by hydrobiological indicators] //Theoretical and applied ecology. 2016. № 3. Page 48-55. (In Russ)
5. Hashirov T.Y., Lamerdonov Z.G., Zhaboyev S.A., Enaldieva M.A., Thabishimov M.M., Lamerdonov K.Z. Informacionnyye tekhnologii i matematicheskoe modelirovaniye pri proektirovaniy beregozashchitnyh sooruzhenij [Information technologies and mathematical modeling in the design of safety structures] //Ecology and industry of Russia. 2019. T. 23. No. 9. pp. 13-17. (In Russ)
6. Pisarenko P.V., Samoilik M.S., Plaksienko I.L., Kolesnikov L.A. Konceptual'nye osnovy obespecheniya resursno-ekologicheskoy bezopasnosti v regione [Conceptual foundations for ensuring resource and environmental safety in the region] //Theoretical and applied ecology. 2019. № 2. pp. 137-142. (In Russ)
7. Ismailova S.T. Informational and analytical model of selection of management methods according to the degree of their influence on the efficiency of production activities of construction organizations/S.T. Ismailova, V.B. Melekhin, V.M. Khachumov// Vesnik DagGTU. Technical sciences. Herald of the Daghestan State Technical University 2017. Vol. 44. No. 3. C. 210-221. (In Russ)
8. Sokolskaya E.V., Kochurov B.I., Dolgov Yu.A., Lobkovsky V.A. Mnogofaktornaya model' kak osnova dlya upravleniya kachestvom okruzhayushchej sredy urbanizirovannyh territorij [Multi-factor model as the basis for environmental quality management of urbanized territories] //Theoretical and applied ecology. 2018. № 2. Page 26-34. (In Russ)
9. Galiulin R.V., Galiulin R.A., Kochurov B.I. Tekhnogennoye zagryazneniye okruzhayushchej sredy kancerogennymi veshchestvami [Technogenic environmental pollution with carcinogenic substances] //Theoretical and applied ecology. 2015. № 2. P. 42. (In Russ)
10. Roeva N.N., Voronich S.S., Zaytsev D.A., Voronich N.S., Chernobyl A.G. O novom sposobe operativnogo opredeleniya moshchnosti promyshlennogo vybrosa zagryaznyayushchego veshchestva [On a new method of rapid determination of the power of industrial emission of pollutant] //Ecology and industry of Russia. 2019. T. 23. No. 12. pp. 34-37 (In Russ)
11. Maslova A.A., Panarin V.M., Grishakov K.V., Fishka N.A., Kotova E.A., Selezneva D.A. Применение искусственных нейронных сетей для прогнозирования уровней загрязнения воздуха и водных объектов [Use of artificial neural networks to predict levels of air and water pollution] //Ecology and industry of Russia. 2019. T. 23. No. 8. P 36-41. (In Russ)
12. Trofimenko Yu.V., Chijova V.S. Obosnovaniye meropriyatij po snizheniyu riska zdorov'yu ot zagryazneniya vozduha vzveshennymi chasticami razmerom menee desyati mikrometrov (RM10) na ulichno-dorozhnoy seti gorodov [Justification of measures to reduce health risk from air pollution with suspended particles of less than ten micrometers (PM10) on the street-road network of cities] //Ecology and industry of Russia. 2019. T. 23. No. 7. Pp. 48-51. (In Russ)
13. Storozev Yu.I., Zlobin V.S. Perspektivnyye resheniya ekologicheskikh problem alyuminievyyh zavodov [Promising Solutions to Environmental Problems of Aluminium Plants] //Ecology and Industry of Russia. 2018. T. 22. No. 12. Pp. 10-13. (In Russ)
14. Vasenina I.V., Sushko V.A. Promyshlennaya ekologiya regiona i kachestvo zhizni mestnogo naseleniya [Industrial ecology of the region and quality of life of the local population] //Ecology and industry of Russia. 2018. T. 22. No. 11. pp. 66-71(In Russ)
15. Golik V.I., Dmitry Yu.V., Mulukhov K.K., Vernigor V.V. Pylevoe zagryazneniye pri otkrytoj razrabotke mestorozhdenij [Dust pollution during open field development] //Ecology and industry of Russia. 2018. T. 22. No. 6. Page 30-34. (In Russ)
16. Rio-de-ZHanejrskaya deklaraciya po okruzhayushchej srede i razvitiyu Prinyata Konferenciej OON po okruzhayushchej srede i razvitiyu, Rio-de-ZHanejro, 3–14 iyunya 1992 goda [Rio Declaration on Environment and Development Adopted by the UN Conference on Environment and Development, Rio de Janeiro, 3-14 June 1992] [Electronic resource]. 2019. (In Russ)
17. Tikunov V.S., Chereshnya O.Y. Indeks zagryazneniya i indeks napryazhyonnosti ekologicheskoy situacii v regionah Rossijskoj Federacii [Pollution index and environmental tension index in regions of the Russian Federation] //Theoretical and applied ecology. 2017. № 3. Page 34-38. (In Russ)

18. Meylanov I.M. Development of forms of state support for industrial construction projects/I.M. Meylanov, A.M. Esetova//Vesnik DagSTU. Technical sciences. Herald of the Daghestan State Technical University 2016. Volume 42. No. 3. S. 220-230. (In Russ)
19. Shishkin N.D., Ilin R.A., Atdayev D.I. Primenenie ekologicheskii effektivnykh vertikal'no-osevykh vetroenergostanovok dlya zapovednikov i nacional'nykh parkov yuga Rossii [Application of ecologically effective vertical-axial wind power plants for reserves and national parks of southern Russia] //Ecology and industry of Russia. 2019. T. 23. No. 11. pp. 43-49. (In Russ)
20. Kalner V.D. Ekologicheskii orientirovannaya sreda obitaniya- integral'nyj kriterij kachestva zhizni [Ecologically Oriented Environment - Integral Criterion of Quality of Life] //Ecology and Industry of Russia. 2019. T. 23. No. 11. pp. 50-54. (In Russ)
21. Yablokov A.V., Levchenko V.F., Kerzhenov A.S. O koncepcii "upravlyaeмой evolyucii" kak al'ternative koncepcii «ustojchivogo razvitiya» [On the concept of "managed evolution" as an alternative to the concept of "sustainable development"] //Theoretical and applied ecology. 2017. № 2. pp. 4-8. (In Russ)
22. Sushko V.A., Buchtiyarov I.N., Zubova O.G. Ekologiya kak faktor formirovaniya kachestva zhizni: metodologiya sociologicheskogo analiza [Ecology as a factor of quality of life formation: methodology of sociological analysis] //Ecology and industry of Russia. 2018. T. 22. No. 2. pp. 58-63. (In Russ)
23. Bolsherotov A.L., Bolsherotova L.V. Sushchestvuyushchie metody otsenki zagryazneniya okruzhayushchei sredy i vozdeistviya na nee [Existing methods of assessment of environmental pollution and impact on it] / A.L. Bolsherotov, L.V. Bolsherotova//Housing construction. 2012. № 11. pp.37-41.

Сведения об авторе:

Большеротов Аркадий Леонидович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры строительного производства; e-mail: bark1091@mail.ru

Information about the authors:

Arkadiy L. Bolsherotov, Dr. Sci., (Technical), Assoc. Prof., Prof., Department of construction production; e-mail: bark1091@mail.ru

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 05.11.2020.

Принята в печать 29.12.2020.

Conflict of interest.

The author declare no conflict of interest.

Received 05.11.2020.

Accepted for publication 29.12.2020.

Для цитирования: А.К. Юсупов, Х.М. Муселемов, Т.О. Устарханов. Эффективность шпренгельных балок с оптимальными параметрами. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2021; 48 (1):141-154. DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-1-141-154

For citation: A. K. Yusupov, H.M. Muselemov, T.O. Ustarhanov. Efficiency of strut-framed beams with optimal parameters. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2021; 48(1):141-154. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-1-141-154

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 624.011

DOI: 10.21822/2073-6185-2021-48-1-141-154

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ШПРЕНГЕЛЬНЫХ БАЛОК С ОПТИМАЛЬНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

А.К. Юсупов, Х.М. Муселемов, Т.О. Устарханов

*Дагестанский государственный технический университет,
367026 г. Махачкала, пр. И.Шамиля, 70, Россия*

Резюме. Цель. На основании теоретических результатов, полученных в статье [17] проведён анализ влияния различных конструктивных параметров на собственный вес и стоимость металла шпренгельной балки с одной стойкой. **Метод.** Выполняются множество числовых примеров и проводятся вариантное проектирование шпренгельных балок с различными конструктивными характеристиками. **Результат.** Составлены расчетные таблицы, которые показывают эффективность шпренгельной балки с оптимальными характеристиками. Построенные таблицы позволяет делать вывод об эффективности оптимальных параметров шпренгельных балок с одной стойкой. **Вывод.** Предлагаемые методика и алгоритм свидетельствуют об эффективности рассматриваемой конструкции. Экономия стали, а также уменьшение стоимости металла шпренгельных балок с одной стойкой по сравнению с обычными балками доходит до 40%.

Ключевые слова: шпренгельная балка, упругоподатливая опора, таблицы, стоимость, собственный вес, оптимальные параметры, алгоритм

EFFICIENCY OF STRUT-FRAMED BEAMS WITH OPTIMAL PARAMETERS

A.K. Yusupov, H.M. Muselemov, T.O. Ustarhanov

*Daghestan State Technical University,
70 I. Shamilya Ave., Makhachkala 367026, Russia*

Abstract. Objective. Based on the theoretical results obtained in the article [17], the analysis of the influence of various design parameters on the sole weight and cost of the metal of a single-strut-framed beam is carried out. Various tables have been compiled that show the efficiency of the strut-framed beam with optimal characteristics. **Methods.** Many numerical examples were carried out, and a pilot design of strut-framed beams with different design characteristics was carried out. The corresponding tables were compiled. **Results.** The constructed tables allow concluding about the effectiveness of the optimal parameters of single-strut-framed beams. **Conclusion.** The proposed method and algorithm indicate the effectiveness of the design. Steel savings and a reduction in the metal cost of single-strut-framed beams compared to conventional beams reach up to 40%.

Keywords: strut-framed beam, elasto-yielding support, tables, cost, sole weight, optimal parameters, algorithm.

Введение. В статье [17] мы рассмотрели оптимизацию параметров шпренгельной балки. На основе теоретических исследований были получены условия, которые позволяют вычислять конструктивные параметры шпренгельных балок с одной стойкой. Результаты исследования

были представлены в виде простых лаконичных формул, удобных для пользования. В данной статье мы продолжаем исследования, связанные с оптимизацией конструктивных параметров шпренгельных балок с одной стойкой. Чтобы не повторяться, далее мы будем делать ссылки на формулы, полученные в статье [17].

Постановка задачи. С целью исследования эффективности предлагаемой методики оптимизации параметров нам необходимо рассмотреть конкретные числовые примеры подбора сечения элементов шпренгельных балок с одной стойкой. Необходимо вычислить собственный вес этих конструкций, а также стоимость металла, который тратится для изготовления этих конструкций. Необходимо выполнить вариантное проектирование шпренгельных балок с одной стойкой.

Введём в рассмотрение 3 марки стали. Характеристики этих сталей приведены ниже в виде табл. 1.

Таблица 1. Характеристики сталей
Table 1. Characteristics of steels

№	Марка стали Steel grade	Стоимость одной тонны стали, руб. Cost of one ton of steel in rubles	Группа стали и расчётное сопротивление Steel group and design resistance
1	ВСт3псб-1	55000	Сталь обычной прочности, Regular strength steel $R_1=220$ МПа
2	ВСт3пс н.обр.	40990	Сталь обычной прочности, Regular strength steel $R_2=270$ МПа
3	15ХСНД	59990	Сталь повышенной прочности, High strength steel $R_3=330$ МПа

Стоимость сталей в табл. 1 соответствует ценам, установленным на московских биржах на первое января 2020 года.

Методы исследования. Рассмотрим различные варианты прокатного широкополочного двутавра. При этом будем пользоваться сортаментом [9,10,12,13].

Вид сечения перекладины – прокатный широкополочный двутавр.

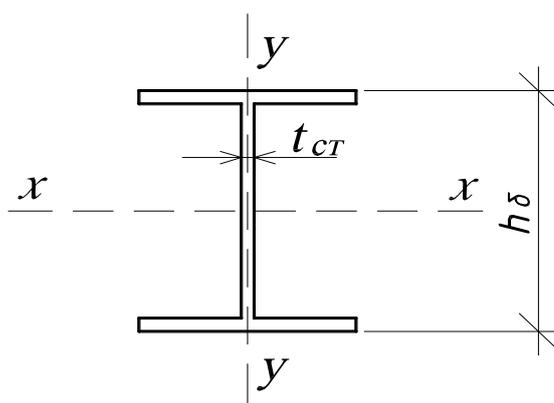


Рис. 1. Прокатный широкополочный двутавр
Fig. 1. Rolled wide-flange I-beam

В практике проектирования строительства чаще всего встречаются равномерно распределённые нагрузки [1, 3-7, 13, 16]. Обычно при расчётах шпренгельных балок используются различные приближённые методы [2, 8, 11]. Формулы, полученные в статье [17], были построены на основании использования точных методов [14, 15],

Для всех ниже рассматриваемых вариантов погонную нагрузку на перекладину примем

равномерно распределённой, $q = 60$ кН/м, а пролёт шпренгельной балки $l = 15$ м. (Рис.1а и рис.2а по статье [17])

В а р и а н т 1

$$k = 0, z = \frac{5}{4};$$

широкополочный двугавр №55Б1.

Геометрические характеристики сечения:

$$h_6 = 54,52 \text{ см}, A = 110 \text{ см}^2,$$

$$\text{погонный вес } g = 86,3 \text{ кг/м},$$

$$J_x = 54480 \text{ см}^4, W_x = 2000 \text{ см}^3,$$

статический момент половины сечения относительно нейтральной оси:

$$S = (27,25 \text{ см} - 6,62 \text{ см}) \cdot 55 \text{ см}^2 = 1134,65 \text{ см}^3,$$

$$\text{толщина стенки } t_{ct} = 0,92 \text{ см}.$$

Внутренние усилия, вычисленные по формулам (15), (23), (24), (26) по статье [17]:

$$M = 421,875 \text{ кН}\cdot\text{м}, N = 1406,25 \text{ кН}, Q = 281,25 \text{ кН}.$$

Напряжения:

$$\sigma_u = \frac{M}{W_x} = \frac{421,875 \text{ кН}\cdot\text{м}}{2000 \text{ см}^3} = 21,09 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2},$$

$$\sigma_0 = \frac{N}{A} = \frac{1406,25 \text{ кН}}{110 \text{ см}^2} = 12,784 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2},$$

$$\tau = \frac{Q \cdot S}{J_x \cdot t_{ct}} = \frac{281,25 \text{ кН} \cdot 1134,65 \text{ см}^3}{54480 \text{ см}^4 \cdot 0,92 \text{ см}} = 6,37 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}.$$

Условие прочности на нейтральной оси (формула 34 по статье [17]):

$$\sqrt{\sigma_0^2 + 3\tau^2} = \sqrt{(12,784)^2 + 3 \cdot (6,37)^2} = 16,89 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} < 33,0 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} = R_3.$$

На фибровых точках (условие 35 по статье [17]);

$$\sqrt{(\sigma_u + \sigma_0)^2} = \sigma_u + \sigma_0 = 21,09 + 12,78 = 33,87 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} \approx 33,0 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} = R_3.$$

Перейдём к другим вариантам. Далее мы не будем давать пояснения, будем приводить только вычисления по аналогии с вариантом 1.

В а р и а н т 2

$$k = 0, z = \frac{5}{4};$$

широкополочный двугавр №70Б1.

Геометрические характеристики сечения:

$$h_6 = 69,36 \text{ см}, A = 162 \text{ см}^2,$$

$$\text{погонный вес } g = 140 \text{ кг/м},$$

$$J_x = 146000 \text{ см}^4, W_x = 3630 \text{ см}^3,$$

$$S = \left(\frac{69,36}{2} - 8,98\right) \text{ см} \cdot \frac{162 \text{ см}^2}{2} = 2081,7 \text{ см}^3, t_{ct} = 1,15 \text{ см}.$$

Внутренние усилия:

$$M = 42187,5 \text{ кН}\cdot\text{см}, N = 1406,25 \text{ кН}, Q = 281,25 \text{ кН}.$$

Напряжения:

$$\sigma_u = \frac{M}{W_x} = \frac{42187,5 \text{ кН}\cdot\text{см}}{3630 \text{ см}^3} = 11,622 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2},$$

$$\sigma_0 = \frac{N}{A} = \frac{1406,25 \text{ кН} \cdot \text{м}}{162 \text{ см}^3} = 8,68 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2},$$

$$\tau = \frac{Q \cdot S}{J_x \cdot t_{\text{ст}}} = \frac{281,25 \text{ кН} \cdot 2081,7 \text{ см}^3}{146000 \text{ см}^4 \cdot 1,15 \text{ см}} = 3,487 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}.$$

Условие прочности на нейтральной оси (формула 34 по статье [17]):

$$\sqrt{\sigma_0^2 + 3\tau^2} = \sqrt{(8,68)^2 + 3 \cdot (3,487)^2} = 10,575 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} < 22 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} = R_1.$$

На фибровых точках;

$$\sigma_u + \sigma_0 = 11,622 + 8,68 = 20,3 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} < 22 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} = R_3.$$

В а р и а н т 3

$$k = 1,387 \cdot 10^{-3}, z = \frac{5}{4,2664};$$

широкополочный двугавр №50Б1.

Геометрические характеристики сечения:

$$h_6 = 49,51 \text{ см}, A = 91,8 \text{ см}^2,$$

$$\text{погонный вес } \rho = 72,1 \text{ кг/м},$$

$$J_x = 37670 \text{ см}^4, W_x = 1520 \text{ см}^3,$$

Статический момент

$$S = \left(\frac{49,51}{2} - 5,99 \right) \text{ см} \cdot \frac{91,8 \text{ см}^2}{2} = 861,31 \text{ см}^3, t_{\text{ст}} = 0,844 \text{ см}.$$

Внутренние усилия :

$$M = 292 \text{ кН} \cdot \text{м}, N = 1318 \text{ кН}, Q = 246 \text{ кН}.$$

Напряжения:

$$\sigma_u = \frac{M}{W_x} = \frac{292 \text{ кН} \cdot \text{м}}{1520 \text{ см}^3} = 19,21 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2},$$

$$\sigma_0 = \frac{N}{A} = \frac{1318 \text{ кН}}{91,8 \text{ см}^2} = 14,36 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2},$$

$$\tau = \frac{Q \cdot S}{J_x \cdot t_{\text{ст}}} = \frac{246 \text{ кН} \cdot 861,31 \text{ см}^3}{37670 \text{ см}^4 \cdot 0,844 \text{ см}} = 7,152 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}.$$

Условие прочности на нейтральной оси (формула 34 по статье [17]):

$$\sqrt{\sigma_0^2 + 3\tau^2} = \sqrt{(14,36)^2 + 3 \cdot (7,152)^2} = 18,96 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} < 33 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} = R_1.$$

На фибровых точках ;

$$\sigma_u + \sigma_0 = 19,91 + 14,36 = 33,57 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} < 33 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} = R_3 - \text{приближенно.}$$

В а р и а н т 4

$$k = 1,387 \cdot 10^{-3}, z = \frac{5}{4,2664};$$

широкополочный двугавр №55Б1.

Геометрические характеристики сечения:

по первому варианту.

Внутренние усилия :

по третьему варианту.

Напряжения:

$$\sigma_u = \frac{M}{W_x} = \frac{292 \text{ кН} \cdot \text{м}}{2000 \text{ см}^3} = 14,6 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2},$$

$$\sigma_0 = \frac{N}{A} = \frac{1318 \text{ кН}}{110 \text{ см}^2} = 11,982 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2},$$

$$\tau = \frac{Q \cdot S}{J_x \cdot t_{\text{ст}}} = \frac{264 \text{ кН} \cdot 1134,65 \text{ см}^3}{54480 \text{ см}^4 \cdot 0,92 \text{ см}} = 5,976 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}.$$

Условие прочности на нейтральной оси :

$$\sqrt{\sigma_0^2 + 3\tau^2} = \sqrt{(11,982)^2 + 3 \cdot (5,976)^2} = 15,834 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} < 27 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} = R_2.$$

На фибровых точках ;

$$\sigma_u + \sigma_0 = 14,6 + 11,982 = 26,582 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} < 27 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} = R_2.$$

В а р и а н т 5

$$k = 0, z = \frac{5}{4};$$

широкополочный двугавр №60Б1.

Геометрические характеристики сечения:

$$h_6 = 59,42 \text{ см}, A = 131 \text{ см}^2,$$

$$\text{погонный вес } \rho = 103 \text{ кг/м},$$

$$J_x = 77430 \text{ см}^4, W_x = 2610 \text{ см}^3,$$

Статический момент:

$$S = \left(\frac{59,42}{2} - 7,18 \right) \text{ см} \cdot \frac{131 \text{ см}^2}{2} = 1468,956 \text{ см}^3, t_{\text{ст}} = 1 \text{ см}.$$

Внутренние усилия по второму варианту.

Напряжения:

$$\sigma_u = \frac{M}{W_x} = \frac{421 \text{ кН} \cdot \text{м}}{2610 \text{ см}^3} = 16,13 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2},$$

$$\sigma_0 = \frac{N}{A} = \frac{1406,25 \text{ кН}}{131 \text{ см}^2} = 10,735 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2},$$

$$\tau = \frac{Q \cdot S}{J_x \cdot t_{\text{ст}}} = \frac{281 \text{ кН} \cdot 1468,956 \text{ см}^3}{77430 \text{ см}^4 \cdot 1 \text{ см}} = 5,33 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}.$$

Условие прочности на нейтральной оси:

$$\sqrt{\sigma_0^2 + 3\tau^2} = \sqrt{(10,735)^2 + 3 \cdot (5,33)^2} = 14,159 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} < 27 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} = R_2.$$

На фибровых точках ;

$$\sigma_u + \sigma_0 = 16,13 + 10,735 = 26,865 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} < 27 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} = R_2.$$

В а р и а н т 6

$$k = 1,387 \cdot 10^{-3}, z = \frac{5}{4,2664};$$

широкополочный двугавр №60Б1.

Геометрические характеристики сечения:

по варианту 5.

Внутренние усилия по варианту 3.

Напряжения:

$$\sigma_u = \frac{M}{W_x} = \frac{29200 \text{ кН} \cdot \text{см}}{2610 \text{ см}^3} = 11,188 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2},$$

$$\sigma_0 = \frac{N}{A} = \frac{1318 \text{ кН}}{131 \text{ см}^2} = 10,061 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2},$$

$$\tau = \frac{Q \cdot S}{J_x \cdot t_{\text{ст}}} = \frac{264 \text{ кН} \cdot 1468,956 \text{ см}^3}{77430 \text{ см}^4 \cdot 1 \text{ см}} = 5,008 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}.$$

Условие прочности на нейтральной оси:

$$\sqrt{\sigma_0^2 + 3\tau^2} = \sqrt{(10,061)^2 + 3 \cdot (5,008)^2} = 13,284 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} < 22 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} = R_1.$$

На фибровых точках ;

$$\sigma_u + \sigma_0 = 11,188 + 10,061 = 21,249 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} < 22 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} = R_1.$$

Из рис.2в по статье [17] следует, что при коэффициенте жёсткости $r = 0$ шпренгельная балка переходит в обычную однопролётную балку, то есть отсутствуют стойка и затяжки, показанные на рис.1 по статье [17].

Из формулы (14) по статье [17] следует при $r \rightarrow 0$ коэффициент $k \rightarrow \infty$. При $k \rightarrow \infty$ (в обычной балке) максимальный изгибающий момент (рис.2в по статье [17]).

$$M = \frac{q \cdot l^2}{8} = \frac{60 \frac{\text{кН}}{\text{м}} \cdot (15\text{м})^2}{8} = 168700 \text{ кН} \cdot \text{см}.$$

Моменты сопротивления изгибу сечения широкополочного прокатного двутавра из сталей, приведённых в табл. 1, даны ниже:

$$1. \quad W_x = \frac{M}{R_1} = \frac{168700 \text{ кН} \cdot \text{см}}{22 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}} = 7213 \text{ см}^3,$$

$$2. \quad W_x = \frac{M}{R_2} = \frac{168700 \text{ кН} \cdot \text{см}}{27 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}} = 6174 \text{ см}^3,$$

$$3. \quad W_x = \frac{M}{R_1} = \frac{168700 \text{ кН} \cdot \text{см}}{33 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}} = 5116 \text{ см}^3.$$

По сортаменту [1], [4], подбираем сечения (номера) прокатного широкополочного двутавра:

$$1. \quad \text{№100Б1 с } W_x = 8940 \text{ см}^3 > 7213,6 \text{ см}^3.$$

$$\text{Погонный вес } \rho = 227 \frac{\text{кг}}{\text{м}},$$

$$\text{общий вес балки } \rho \cdot l = 227 \frac{\text{кг}}{\text{м}} \cdot 15\text{м} = 3405 \text{ кг}.$$

$$2. \quad \text{№90Б1 с } W_x = 6920 \text{ см}^3 > 6174 \text{ см}^3.$$

$$\text{Погонный вес } \rho = 193 \frac{\text{кг}}{\text{м}},$$

$$\text{общий вес балки } \rho \cdot l = 193 \frac{\text{кг}}{\text{м}} \cdot 15\text{м} = 2895 \text{ кг}.$$

$$3. \quad \text{№90Б1 с } W_x = 6920 \text{ см}^3 > 5116,1 \text{ см}^3.$$

$$\text{Погонный вес } \rho = 193 \frac{\text{кг}}{\text{м}},$$

$$\text{общий вес балки } \rho \cdot l = 193 \frac{\text{кг}}{\text{м}} \cdot 15\text{м} = 2895 \text{ кг}.$$

Итак, мы рассмотрели 9 вариантов балок. Для наглядности подведем результаты.

Обычная (не шпренгельная) балка (широкополочный прокатный двутавр) :

$k \rightarrow \infty, z \rightarrow 0$.

$$1. \quad \text{№100Б1} \quad R_1 = 22 \text{ кН/см}^2, \quad \rho = 227 \text{ кг/м}.$$

Общий вес балки 3405 кг.

$$2. \quad \text{№90Б1} \quad R_2 = 27 \text{ кН/см}^2, \quad \rho = 193 \text{ кг/м}.$$

Общий вес балки 2895 кг.

$$3. \quad \text{№90Б1} \quad R_3 = 33 \text{ кН/см}^2, \quad \rho = 193 \text{ кг/м}.$$

Общий вес балки 2895 кг.

При $k = 0$, $z = \frac{5}{4}$ переключины шпренгельной балки рассчитываются по упрощённой расчётной схеме (Рис.1в по статье [17]). На рис.1в пружина – абсолютно жёсткая: балка двухпролётная ($r \rightarrow \infty$).

1. №70Б1 $R_1 = 22 \text{ кН/см}^2$, $\rho = 140 \text{ кг/м}$.

Общий вес переключины $\rho \cdot l = 140 \text{ кг/м} \cdot 15 = 2100 \text{ кг}$.

2. №60Б1 $R_2 = 27 \text{ кН/см}^2$, $\rho = 103 \text{ кг/м}$.

Общий вес переключины 1545 кг.

3. №55Б1 $R_2 = 33 \text{ кН/см}^2$, $\rho = 86,3 \text{ кг/м}$.

Общий вес переключины 1294,5 кг.

Далее: по рис.1б по статье [17]

Шпренгельная балка имеет оптимизированные параметры:

$$k = 1,387 \cdot 10^{-3}, z = \frac{5}{4,2664};$$

1. №60Б1 $R_1 = 22 \text{ кН/см}^2$, $\rho = 103 \text{ кг/м}$.

Общий вес переключины $\rho \cdot l = 103 \text{ кг/м} \cdot 15 \text{ м} = 1545 \text{ кг}$.

2. №55Б1 $R_2 = 27 \text{ кН/см}^2$, $\rho = 86,3 \text{ кг/м}$.

Общий вес переключины 1294,5 кг.

3. №50Б1 $R_2 = 33 \text{ кН/см}^2$, $\rho = 72,1 \text{ кг/м}$.

Общий вес переключины 1081,5 кг.

Теперь перейдём к вычислению массы затяжек и стойки шпренгельной балки (рис.1а по статье [17]).

Вариант, когда $k = 0$, $z = \frac{5}{4}$.

Из формул (15) и (16) по статье [17] следует, что усилие в затяжке

$$F_3 = 1,56 \cdot q \cdot l$$

Найдём площадь сечения затяжки

$$A_3 = \frac{F_3}{R_2} = \frac{1,56 \cdot 60 \frac{\text{кН}}{\text{м}} \cdot 15\text{м}}{27 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}} = 52 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

При $k = 1,387 \cdot 10^{-3}$, $z = \frac{5}{4,2664}$, по формулам (15) и (16) по статье [17] находим $F_3 = 1,46 \cdot q \cdot l$,

$$A_3 = \frac{1,46 \cdot q \cdot l}{R_2} = \frac{1,46 \cdot 60 \frac{\text{кН}}{\text{м}} \cdot 15\text{м}}{27 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}} = 48,66 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

Аналогично вычисляется площадь сечения затяжки при $R = R_1$ и $R = R_2$.

Геометрическая длина l_3 одной затяжки (по рис.1а по статье [17])

$$l_3 = \sqrt{\left(\frac{l}{2}\right)^2 + h^2} = \sqrt{\left(\frac{15\text{м}}{2}\right)^2 + (0,1 \cdot 15\text{м})^2} = 7,65\text{м}.$$

Длина двух затяжек $2 \cdot l_3 = 15,3\text{м}$.

При $k = 0$ вес двух затяжек равен

$$2 \cdot l_3 \cdot A_3 \cdot 7850 \text{ кг/м}^3 = 15,3 \text{ м} \cdot 52 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \cdot 7850 \text{ кг/м}^3 = 0,6245 \text{ т} = 624,5\text{кг}.$$

При $k = 1,387 \cdot 10^{-3}$ вес двух затяжек

$$2 \cdot l_3 \cdot A_3 \cdot 7850 \text{ кг/м}^3 = 15,3 \text{ м} \cdot 48,66 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \cdot 7850 \text{ кг/м}^3 = 0,5845 \text{ т} = 584,5\text{кг}.$$

Стойка.

Длина стойки (рис.1а по статье [17]) $l_{ст} \approx h$.

По конструктивным соображениям выше было принято $\frac{h}{l} = 0,1$.

С учётом этого определим длину стойки $l_{ст} = 0,1 \cdot l = 0,1 \cdot 15\text{м}$.

Из условия равновесия узла (рис.3 по статье [17]) следует, что усилие в стойке

$$F_0 = 2 \cdot F_3 \cdot \sin\alpha = 2 \cdot F_3 \cdot \frac{h}{l} = 4 \cdot F_3 \cdot \frac{h}{2l} = 4 \cdot F_3 \cdot 0,1 = 0,4 \cdot F_3.$$

Как было показано выше, усилие в затяжке: при $k = 0$

$$F_3 = 1,56 \cdot q \cdot l, \quad \text{при } k = 1,387 \cdot 10^{-3} \quad F_3 = 1,46 \cdot q \cdot l.$$

С учётом этого усилие в стойке найдём в двух вариантах:

$$\begin{aligned} \text{при } k = 0 \quad F_0 &= 0,4 \cdot 1,56 \cdot q \cdot l; \\ \text{при } k = 1,387 \cdot 10^{-3} \end{aligned}$$

$$F_0 = 0,4 \cdot F_3 = 0,4 \cdot 1,56 \cdot q \cdot l = 0,4 \cdot 1,56 \cdot 60 \frac{\text{кН}}{\text{м}} \cdot 15 \text{ м} = 525,6 \text{ кН}$$

Площадь сечения стойки при $k = 0$

$$A_{ст} = \frac{F_0}{R_2} = \frac{561,6 \text{ кН}}{27 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}} \approx 21 \text{ см}^2,$$

при $k = 1,387 \cdot 10^{-3}$

$$A_{ст} = \frac{F_0}{R_2} = \frac{525,6 \text{ кН}}{27 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}} \approx 19 \text{ см}^2.$$

Сечение стойки удобно назначать по конструктивным соображениям. Поэтому примем приближённо $A_{ст} \approx 52 \text{ см}^2 = 52 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$

Поскольку длина стойки $l_{ст} \approx h$ – незначительна, то принятая выше площадь не окажет влияния на сравнительный анализ.

Вес стойки:

$$l_{ст} \cdot A_{ст} \cdot 7850 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} = 0,1 \cdot 15 \text{ м} \cdot 52 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 = 61,2 \text{ кг}$$

Общий вес двух затяжек и стойки при $k = 0$

$$0,6245 \text{ т} + 61,2 \text{ кг} = 0,6857 \text{ т};$$

при $k = 1,387 \cdot 10^{-3}$

$$0,5845 \text{ т} + 61,2 \text{ кг} = 0,6457 \text{ т}.$$

Обсуждение результатов. На основании приведённых выше примеров ниже составлены таблицы (2-7), которые позволяют проводить анализ рассмотренных выше вариантов. По расчётной схеме рис.1б. по статье [17] $k = 1,387 \cdot 10^{-3}$, $z = \frac{5}{4,2664}$

Таблица 2. Характеристики шпренгельных балок
Table 2. Characteristics of truss beams

№	Марка стали Steel grade	Стоимость одной тонны стали, руб. Cost of one ton of steel in rubles	Группа стали и расчётное сопротивление Steel group and design resistance	Номер широкополочного двутавра Wide beam I-beam number	Вес одного погонного метра и общий вес перекладины Weight of one running meter and total weight of the crossbar	Стоимость одного погонного метра и общая стоимость перекладины, руб. The cost of one running meter and the total cost of the crossbar
1	ВСт3пс6-1	55000	Сталь обычной прочности, Regular strength steel $R_1=220$ МПа	60Б1	103 кг/м. $103 \cdot 15 = 1545$ кг	5665 84975
2	ВСт3пс6-2 н.обр	41000	Сталь обычной прочности, Regular strength steel $R_2=270$ МПа	55Б1	86,3 кг/м. $86,3 \cdot 15 = 1294,3$ кг	3638,3. 54574,5
3	15ХСНД	60000	Сталь повышенной прочности, High strength steel $R_3=330$ МПа	50Б1	72,1 кг/м. $72,1 \cdot 15 = 1081,5$ кг	4326 64890

С учётом веса и стоимости стойки и затяжек табл. 2 уточняем (табл. 3).

Таблица 3. Вес и стоимость шпренгельной балки
Table 3. Weight and cost of truss girder

№	Вес шпренгельной балки, кг Truss beam weight, kg	Стоимость шпренгельной балки, руб. Truss beam cost, rub
1	2191	111448
2	1938	81048,2
3	1727	91364

По расчётной схеме рис.1в. по статье [17] $k = 0$, $z = \frac{5}{4}$

Таблица 4. Характеристики шпренгельных балок
Table 4. Characteristics of truss beams

№	Марка стали Steel grade	Стоимость одной тонны стали, руб. Cost of one ton of steel in rubles	Группа стали и расчётное сопротивление Steel group and design resistance	Номер широкополочного двутавра Wide beam I-beam number	Вес одного погонного метра и общий вес перекладины Weight of one running meter and total weight of the crossbar	Стоимость одного погонного метра и общая стоимость перекладины, руб. The cost of one running meter and the total cost of the crossbar
1	ВСтЗпсб-1	55000	Сталь обычной прочности, Regular strength steel $R_1=220$ МПа	60Б1	103 кг/м. 1545кг	5665. 84975.
2	ВСтЗпсб-2 н.обр	41000	Сталь обычной прочности, Regular strength steel $R_2=270$ МПа	55Б1	86,3 кг/м. 1294,3 кг	3638,3. 54574,5.
3	15ХСНД	60000	Сталь повышенной прочности, High strength steel $R_3=330$ МПа	50Б1	72,1 кг/м. 1081,5 кг	4326. 64890.

С учётом веса и стоимости стойки и затяжек табл. 4 уточняем (табл. 5)

Таблица 5. Вес и стоимость шпренгельной балки
Table 5. Weight and cost of truss girder

№	Вес шпренгельной балки, кг Truss beam weight, kg	Стоимость шпренгельной балки, руб. Truss beam cost, rub
1	2785,7	144664
2	2231	91459
3	1980	111784

По расчётной схеме рис.1г. по статье [17] $k \rightarrow \infty$, $r \rightarrow 0$

Таблица 6. Характеристики шпренгельных балок
Table 6. Characteristics of truss beams

№/№	Марка стали Steel grade	Стоимость одной тонны стали, руб. Cost of one ton of steel in rubles	Группа стали и расчётное сопротивление Steel group and design resistance	Номер широкополочного двутавра Wide beam I-beam number	Вес одного погонного метра и общий вес перекладины Weight of one running meter and total weight of the cross-bar	Стоимость одного погонного метра и общая стоимость перекладины, руб. The cost of one running meter and the total cost of the crossbar
1	ВСт3пс6-1	55000	Сталь обычной прочности, Regular strength steel $R_1=220$ МПа	100Б1	227 кг/м. 3405кг	12485 187275
2	ВСт3пс6-2 н.обр	41000	Сталь обычной прочности, Regular strength steel $R_2=270$ МПа	90Б1	193 кг/м. 2895 кг	8913,0. 133695.
3	15ХСНД	60000	Сталь повышенной прочности, High strength steel $R_3=330$ МПа	90Б1	193 кг/м. 2895 кг	11580 173700

На основании составленных выше вычислений скомпоуем сводную табл. 7.

Таблица 7. Эффективность шпренгельных балок с оптимизированным значением
Table 7. Efficiency of truss girders with optimized value

№	Марка стали Steel grade	Значение коэффициента Coefficient value "K"	Вес конструкции в целом в кг Weight of the structure as a whole in kg	Стоимость металла всей конструкции в руб. Cost of the metal of the entire structure	Процентное соотношение в весе Percentage in weight, %	Процентное соотношение в стоимости Percentage in value %
1	ВСт3пс6-1 $R_1=220$ МПа	$k = 0$	2785,7	144664	81,8	77,25
		$1,387 \cdot 10^{-3}$	2191	111448	64,35	59,50
		$k \rightarrow \infty$	3405	187275	100	100
2	ВСт3пс6-2 н.обр $R_2=270$ МПа	$k = 0$	2231	91459	77,1	68,3
		$1,387 \cdot 10^{-3}$	1938	81048	68,2	60,2
		$k \rightarrow \infty$	2895	133695	100	100
3	15ХСНД $R_3=330$ МПа	$k = 0$	1980	111784	69,39	67,8
		$1,387 \cdot 10^{-3}$	1727	91364	59,65	52,6
		$k \rightarrow \infty$	2895	173700	100	100

Вывод. Из табл. 7 видно, что шпренгельные балки с оптимизированным значением коэффициента «к» ($k = 1,387 \cdot 10^{-3}$) рациональны как по затрате металла, так и по стоимости.

Шпренгельные балки с оптимизированными параметрами легче и дешевле по расходу металла примерно на 40% по сравнению с обычными балками. Причём это наблюдается для всех марок сталей, рассмотренных выше. Поэтому мы рекомендуем проектировать шпренгельные балки, для которых коэффициент $k = 1,387 \cdot 10^{-3}$.

Результаты исследования работы шпренгельных балок, приведенные в статье [17] и в настоящей методике, могут найти широкое применение при проектировании таких конструкций.

Библиографический список:

1. Акаев Н.К., Юсупов А.К. Алгоритм расчета шпренгельных подкрановых балок. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. Том 42, №3, 2016 г. С.119-131.
2. Ажермачев С.Г. Приближенный метод расчета шпренгельных подкрановых балок. Строительство и технологическая безопасность. Выпуск 37, 2011 г. С.34-39.
3. Клык В.М., Я.М. Лихтарников Расчет стальных конструкций. М.:75г. С.30-41.
4. Ливановский Н.Н., Богатырева И.В. Усиление железобетонных балок шпренгельными затяжками и вложенными шпренгелями. XII международная конференция студентов и молодых ученых «перспективы развития фундаментальных наук» Россия, Томск, 21-24 апреля 2015 г. С.1338-1340.
5. Муселемов Х.М., Устарханов О.М., Юсупов А.К. Разработка и исследование шпренгельных балок новой раскройки. Сб.V Международной научно-практической конференции "Научные исследования: от теории к практике". Технические науки. Том 2. Г. Чебоксары. 2015. С.62-70.
6. Металлические конструкции. Под редакцией Е.И. Беленя, Москва, Стройиздат, 1986 г. С.382-384.
7. Металлические конструкции. Под редакцией Ю.И. Кудишина, Москва, Академия, 2011г. С.439-442.
8. Пат. 130333 РФ. МПК E04G 23/02. Шпренгель для усиления и обеспечения живучести изгибаемого железобетонного элемента / В.С. Плевков, Г.И. Однокопылов, И.В. Богатырева. Заявлено 08.02.2013; Опубл. 20.07.2013, Бюл. № 20. 5 с.
9. Стальные конструкции. Справочник конструктора. Под ред. Мельникова Н.П. М.: Стройиздат, 1980. С.195-196.
10. СП 16.13330.2017 «Стальные конструкции». М.: Стандартинформ, 2017. АО "НИЦ "Строительство" – ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, 92 с.
11. Устарханов О.М., Юсупов А.К., Муселемов Х.М. Шпренгельные подкрановые балки. Махачкала: ДГТУ, 2016. 120 с.
12. Ф. Харт (Мюнхен), В. Хенн (Брауншвайг), Х. Зонтаг (Берлин), Москва, Стройиздат, 1977г. «Атлас стальных конструкций». С. 37-84
13. Юсупов А.К. «Металлические конструкции в вопросах, в ответах и в проектировании». Махачкала, Дагестанский государственный технический университет. ГУП «Типография ДНЦ РАН», 2010.
14. Юсупов А.К. «Методы прикладной математики в строительной механике», том 1. Махачкала, Дагестанский государственный технический университет. ГУП «Типография ДНЦ РАН», 2008.
15. Юсупов А.К. «Методы прикладной математики в строительной механике», том 4. Махачкала, Дагестанский государственный технический университет. ГУП «Типография ДНЦ РАН», 2008.
16. Юсупов А.К., Муселемов Х.М., Устарханов Т.О., Джалалов Ш.Г. «Исследование металлодеревянной балки». «Вестник Машиностроения», №12, 2019.
17. Юсупов А.К., Муселемов Х.М., Устарханов Т.О. Оптимизация параметров шпренгельной балки. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки, Том 47, №4, 2020 г. С.119-131.

References:

1. Akayev N.K., Yusupov A.K. Algoritm rascheta shprengel'nykh podkranovykh balok. VESTNIK DGTU, Tom 42, №3, 2016 g. С.119-131. [Akaev N.K., Yusupov A.K. Algorithm for calculating truss crane beams. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences, Vol.42, No. 3, 2016. pp.119-131. (In Russ)]
2. Azhermachev S.G. Priblizhennyuy metod rascheta shprengel'nykh podkranovykh balok. Stroitel'stvo i tekhnogen-naya bezopasnost'. Vypusk 37, 2011 g. С.34-39. [Azhermachev S.G. Approximate method for calculating truss crane beams. Construction and man-made safety. Issue 37, 2011. pp.34-39. (In Russ)]
3. Klykov V.M., YA.M. Likh-tarnikov Raschet stal'nykh konstruksiy. M-75g. С.30-41. [Klykov VM, Ya.M. Likh-tarnikov Calculation of steel structures. M.:75g. pp.30-41. (In Russ)]

4. Livandovskiy N.N., Bogatyreva I.V. Usileniye zhelezobetonnykh balok shprengel'nymi zatyazhkami i vlozhennymi shprengelyami. XII mezhdunarodnaya konferentsiya studentov i molodykh uchenykh «perspektivy razvitiya fundamental'nykh nauk» Rossiya, Tomsk, 21-24 aprelya 2015 g. S.1338-1340. [Livandovsky N.N., Bogatyreva I.V. Reinforcement of reinforced concrete beams with truss ties and embedded trusses. XII International Conference of Students and Young Scientists "Prospects for the Development of Fundamental Sciences" Russia, Tomsk, April 21-24, 2015. pp.1338-1340. (In Russ)]
5. Muselemov KH.M., Ustarkhanov O.M., Yusupov A.K. Razrabotka i issledovaniye shprengel'nykh balok novoy raskroyki. V Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskoy konferentsii "Nauchnyye issledovaniya: ot teorii k praktike". Tekhnicheskiye nauki. Tom 2. G. Cheboksary. 2015. s.62-70. [Muselemov Kh.M., Ustarkhanov O.M., Yusupov A.K. Development and research of new cut truss beams. V International scientific-practical conference "Scientific research: from theory to practice". Technical science. Vol. 2.G. Cheboksary. 2015. pp.62-70. (In Russ)]
6. Metallicheskiye konstruksii – pod redaktsiyey Ye.I. Belenya, Moskva, Stroyizdat, 1986 g. C.382-384. [Metal structures. Edited by E.I. Belenya, Moscow, Stroyizdat, 1986, pp. 382-384. (In Russ)]
7. Metallicheskiye konstruksii - pod redaktsiyey YU.I. Kudishina, Moskva, Akademiya, 2011g. C.439-442. [Metal structures. Edited by Yu.I. Kudishina, Moscow, Academy, 2011 pp.439-442. (In Russ)]
8. Pat. 130333 RF. MPK E04G 23/02. Shprengel' dlya usileniya i obespecheniya zhivuchesti izgibayemogo zhelezobetonnoy elementa / V.S. Plevkov, G.I. Odnokopylov, I.V. Bogatyreva. Zayavleno 08.02.2013; Opubl. 20.07.2013, Byul. № 20. 5 s. [Pat. 130333 RF. IPC E04G 23/02. Sprengel for strengthening and ensuring the survivability of a bent reinforced concrete element / V.S. Plevkov, G.I. Odnokopylov, I.V. Bogatyrev. Stated 02/08/2013; Publ. 20.07.2013, Bul. No. 20. 5 p. (In Russ)]
9. Stal'nyye konstruksii. Spravochnik konstruktora. Pod red. Mel'nikova N.P. M.: Stroyizdat,1980. C.195-196. [Steel structures. Constructor reference. Ed. Melnikova N.P. M.: Stroyizdat, 1980. pp.195-196. (In Russ)]
10. SP 16.13330.2017 «Stal'nyye konstruksii». M.: Standartinform, 2017. AO "NITS "Stroitel'stvo" TSNIISK im. V.A. Kucherenko, 92 s. [SP 16.13330.2017 "Steel structures". M.: Standartinform, 2017. JSC "Research Center" Construction "- TsNIISK named after V.A.Kucherenko, 92 p. (In Russ)]
11. Ustarkhanov O.M., Yusupov A.K., Muselemov KH.M. Shprengel'nyye podkranovyye balki. Makhachkala: DGTU, 2016. 120 s. [Ustarkhanov OM, Yusupov AK, Muselemov Kh.M. Sprengel crane beams. Makhachkala: DSTU, 2016.120 p. (In Russ)]
12. F. Khart (Myunkhen), V. Khenn (Braunshvayg), KH. Zontag (Berlin), Moskva, Stroyizdat, 1977g. «Atlas stal'nykh konstruksiy». S. 37-84 [F. Hart (Munich), W. Henn (Braunschweig), H. Sontag (Berlin), Moscow, Stroyizdat, 1977. "Atlas of Steel Structures". pp. 37-84 (In Russ)]
13. Yusupov A.K. «Metallicheskiye konstruksii v voprosakh, v otvetakh i v proyektirovanii». Makhachkala, Dagestanskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet. GUP «Tipografiya DNTS RAN», 2010. [Yusupov A.K. "Metal structures in questions, answers and design." Makhachkala, Daghestan State Technical University. State Unitary Enterprise "Printing House of the DSC RAS", 2010. (In Russ)]
14. Yusupov A.K. «Metody prikladnoy matematiki v stroitel'noy mekhanike», tom 1. Makhachkala, Dagestanskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet. GUP «Tipografiya DNTS RAN», 2008. [Yusupov A.K. "Methods of Applied Mathematics in Structural Mechanics", Volume 1. Makhachkala, Daghestan State Technical University. State Unitary Enterprise "Printing House of the DSC RAS", 2008. (In Russ)]
15. Yusupov A.K. «Metody prikladnoy matematiki v stroitel'noy mekhanike», tom 4. Makhachkala, Dagestanskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet. GUP «Tipografiya DNTS RAN», 2008. [Yusupov A.K. "Methods of Applied Mathematics in Structural Mechanics", Volume 4. Makhachkala, Daghestan State Technical University. State Unitary Enterprise "Printing House of the DSC RAS", 2008. (In Russ)]
16. Yusupov A.K., Muselemov KH.M., Ustarkhanov T.O., Dzhahalov SH.G. «Issledovaniye metalloderevyannoy balki». «Vestnik Mashinostroyeniya», №12, 2019 [Yusupov A.K., Muselemov H.M., Ustarkhanov T.O., Dzhahalov Sh.G. "Study of a metal-wood beam". "Bulletin of Mechanical Engineering", No. 12, 2019. (In Russ)]
17. Yusupov A.K., Muselemov KH.M., Ustarkhanov T.O. Optimizatsiya parametrov shprengel'noy balki. Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki, Tom 47, №4, 2020. s.119-131.[Yusupov A.K., Muselemov H.M., Ustarkhanov T.O. Optimization of truss beam parameters. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Sciences, Vol. 47, No. 4, 2020 pp.119-131(In Russ)]

Сведения об авторах:

Юсупов Абусуян Курашевич, доктор технических наук, профессор, кафедра «Строительные конструкции и гидротехнические сооружения»; e-mail: hairulla213@mail.ru

Муселемов Хайрулла Магомедмуратович, кандидат технических наук, доцент, кафедра «Строительные конструкции и гидротехнические сооружения»; e-mail: hairulla213@mail.ru

Устарханов Тагир Османович, ассистент, кафедра «Строительные материалы и инженерные сети»; e-mail: hairulla213@mail.ru

Information about the authors:

Abusupyan K.Yusupov, Dr. Sci. (Technical), Prof., Department of Building Structures and Hydraulic Structures, e-mail: hairulla213@mail.ru

Khairulla M.Muselemov, Cand.Sci. (Technical), Assoc. Prof., Department of Building Structures and Hydraulic Structures, e-mail: hairulla213@mail.ru

Tagir O. Ustarkhanov, Assistant, Department of Building Materials and Engineering Networks, e-mail: hairulla213@mail.ru

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 29.11.2020.

Принята в печать 19.01.2021.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 29.11.2020.

Accepted for publication 19.01.2021.

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: ФИО, место работы, ученое звание, должность (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 науки и высшего образования 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: Name, place of work, academic rank, position.

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 48– №1 – 2021.

HERALD
OF DAGHESTAN STATE TECHNICAL UNIVERSITY. TECHNICAL SCIENCES
Makhachkala, Volume 48, No.1 2021.

Верстка: Шагина С.Б.
Перевод: Субачев Ю.В.

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
Translation: Yuri V. Subachev

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 31.03.2021г. Сдано в печать 31.03.2021г.

Формат 60x84 ¹/₈. Гарнитура «Times». Бумага офсетная

Тираж 500. Усл. п.л. 22,00 Уч. изд.л. 22,00

Заказ № ____

Отпечатано в типографии ООО «Издательство «Лотос»
367018. Республика Дагестан, г. Махачкала, пр-кт Петра I, 61.