

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, № 2, 2021.

ВЕСТНИК

**ДАГЕСТАНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА.**

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Volume 48, No.2, 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; CyberLeninka, 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, № 2, 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

2.4.8. (05.04.03) – Машины и аппараты, процессы холодильной и криогенной техники, систем кондиционирования и жизнеобеспечения, 2.5.10 (05.04.13) – Гидравлические машины и гидропневмоагрегаты

2.3.1 (05.13.01) – Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям)

2.3.3. (05.13.06) – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям)

2.3.4. (05.13.10) – Управление в социальных и экономических системах

2.3.7. (05.13.12) – Системы автоматизации проектирования (по отраслям)

2.3.5 (05.13.18) – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

2.3.6. (05.13.19) – Методы и системы защиты информации, информационная безопасность

2.1.3. (05.23.03) – Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение (технические науки),

2.1.5 (05.23.05) – Строительные материалы и изделия (технические науки),

2.1.9 (05.23.17) – Строительная механика

2.1.10 (05.23.19) – Экологическая безопасность строительства и городского хозяйства

Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. Том 48, № 2

Махачкала, 2021. – 136с.

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/>

ПАМЯТИ ИСМАИЛОВА ТАГИРА АБДУРАШИДОВИЧА

Ушел из жизни Тагир Абдурашидович Исмаилов – президент ДГТУ, депутат Народного Собрания РД, Заслуженный деятель науки РФ, Почетный работник высшего профессионального образования РФ, доктор технических наук, профессор, главный редактор научного журнала «Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки».

Тагир Абдурашидович родился 5 декабря 1953 года. После окончания с отличием физического факультета Дагестанского государственного университета в 1975 году основную трудовую деятельность реализовал в Дагестанском государственном техническом университете. Работал в должностях младшего научного сотрудника, ассистента, старшего преподавателя, доцента, профессора, заведующего кафедрой, декана факультета, проректора по информатизации, проректора по учебной работе, первого проректора, ректора, президента.



На протяжении всего профессионального пути он активно занимался научно-исследовательской и изобретательской деятельностью. В 1982 году по окончании аспирантуры в г. Ленинград защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата наук, а в 1992 г. ему была присвоена степень доктора технических наук. Тагир Абдурашидович – автор более 800 научных работ, которые стали заметным вкладом в область изучения полупроводниковых термоэлектрических устройств. Им было получено более 400 патентов на изобретения. Тагир Абдурашидович являлся членом Экспертного совета по высшему образованию при Комитете Государственной Думы РФ по образованию и науке, депутатом Народного Собрания Республики Дагестан, заместителем секретаря Дагестанского регионального отделения Всероссийской политической партии «Единая Россия», действительным членом Российской инженерной академии, Международной академии холода, Международной академии информатизации, Международной академии открытого образования, Нью-Йоркской академии наук, членом Совета российского союза ректоров, заместителем председателя Ассоциации инженерного образования России, председателем регионального отделения Российского профессорского собрания и председателем Совета ректоров вузов РД.

Исмаилов Т.А. внес большой вклад в развитие высшего образования, традиций подвижничества и высокого служения государственным интересам; воспитал блестящую плеяду учеников – продолжателей его идей, широко известных в научных кругах страны. За работу по воспитанию молодежи, активное участие в общественной жизни университета и республики в 1974 и 1985 гг. награжден двумя Почетными грамотами Президиума Верховного Совета ДАССР, Почетной грамотой Республики Дагестан; являлся лауреатом премии Комсомола в области науки и техники. Награжден бронзовой и серебряной медалями ВДНХ СССР.

Ему были присвоены звания «Заслуженный изобретатель Республики Дагестан», «Заслуженный деятель науки Российской Федерации», «Лучший педагог РФ», «Ученый года РФ». Неоднократно удостоивался звания «Ректор года» Российской Федерации. В номинации «За особый вклад в области науки» награжден орденом Святой Софии в г. Оксфорд (Великобритания). Награжден орденом «За заслуги в развитии инженерного образования РФ» и золотой медалью лауреата «Личность Петербурга».

Исмаилов Т.А. – лауреат государственных премий РД за 2003 и 2013 годы в области науки и техники. В 2007 году за достигнутые трудовые успехи и многолетнюю плодотворную работу Указом Президента РФ ему вручен орден Почета, а в 2012 г. объявлена благодарность Президента РФ. В 2013 г. награжден орденом «За заслуги перед Республикой Дагестан».

Ушел из жизни крупный учёный и изобретатель, талантливый педагог и мудрый наставник, высокопрофессиональный инженер-физик. Светлая память о нем навсегда останется в сердцах коллег и студентов, всех, с кем он жил и работал.

СОДЕРЖАНИЕ

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ ..9

А.Ю. Баранов, М.И. Давыденко, Е.В. Соколова, О.А. Филатова

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ НАСОСА СИСТЕМЫ ОТГРУЗКИ СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА ИЗ КРУПНОТОННАЖНЫХ ХРАНИЛИЩ ПУТЕМ МОДЕРНИЗАЦИИ КОНСТРУКЦИИ9

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ20

Г.К. Асланов, Т.Г. Асланов

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СРЕДНЕГО ЗНАЧЕНИЯ ОШИБКИ В ВЫЧИСЛЕНИИ КООРДИНАТ ЭПИЦЕНТРА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ20

А.В. Бацких, В.В. Конобеевских, С.В. Ефимов

СПОСОБЫ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПОДСИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ДОСТУПОМ НА ОБЪЕКТАХ ИНФОРМАТИЗАЦИИ ОРГАНОВ ВНУТРЕННИХ ДЕЛ И АСПЕКТЫ ИХ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ29

С. Родригес Васкес, Н.В. Мокрова

ГИБРИДНЫЕ АЛГОРИТМЫ ГЕОПРОСТРАНСТВЕННОГО АНАЛИЗА ТОЧЕК РАСПОЛОЖЕНИЯ ПЛОТИН В ЗАДАЧАХ ЗАЩИТЫ ОХРАНЯЕМЫХ РАЙОНОВ40

Ю.С. Труфанов

РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ БАЛАНСОВЫХ СХЕМ ТОВАРНО-СЫРЬЕВЫХ ПАРКОВ НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕГО ЗАВОДА50

Р.А. Хураמיшина, В.В. Соколова

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ АСФАЛЬТОСМОЛОПАРАФИНОВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ60

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА73

А.С. Гаврилов, А.Е. Сергеев

МЕРЫ ПО ПОВЫШЕНИЮ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ ЗДАНИЯ73

С.С. Добросмыслов, Н.Н. Рожкова, А.Ф. Рожков, М.А. Перькова, С.А. Алиев

ВЛИЯНИЕ ВОЗДУШНОЙ ПРОСЛОЙКИ НА ТЕМПЕРАТУРНО-ВЛАЖНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАРУЖНОЙ ОГРАЖДАЮЩЕЙ КОНСТРУКЦИИ ПРИ ВНУТРЕННЕМ УТЕПЛЕНИИ81

Д.Ф. Карпов, М.В. Павлов

ОЦЕНКА ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ СТРОИТЕЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ ПО АНАЛИЗУ ТЕРМОГРАММ92

А.А.Крутилин, Т.В. Кранчетова, Н.А. Инькова, О.К.Пахомова

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, СОПРОВОЖДАЮЩИХ
 КОРРОЗИЮ ЦЕМЕНТОВ («СЛЁЖИВАНИЕ») ВО ВЛАЖНОМ ВОЗДУХЕ, СОДЕРЖАЩЕМ
 УГЛЕКИСЛОТУ 103

Т.А. Рафальская.

ВЛИЯНИЕ ВЛАГОНАКОПЛЕНИЙ В НАРУЖНЫХ СТЕНАХ НА ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ
 ПОМЕЩЕНИЙ ПРИ АВАРИЙНОМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИИ 113

О.М. Устарханов, Х.М. Муселемов, Х.М. Гаппаров

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ТРЕХСЛОЙНОЙ КОНСТРУКЦИИ
 С УЧЕТОМ ГИПОТЕЗЫ О КУБИЧЕСКОМ РАСПРЕДЕЛЕНИИ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ
 ПО ТОЛЩИНЕ ЗАПОЛНИТЕЛЯ 124

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ 133

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

Editor-in-Chief: <u>Tagir A. Ismailov</u> , Doctor of Technical Science, Professor, President Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia;	Research areas
Deputy Editor: Aida M. Esetova, Doctor of Economics, Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia;	2.4.8 (05.04.03) -
Editorial Board: Abakar D. Abakarov, Doctor of Technical Science, Professor, Head of the Department, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia;	Machines and devices,
Rasul M. Aliev, Doctor of Technical Science Professor, Head of the Department, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia;	processes of refrigeration
Alexander P. Adamov, Doctor of Technical Science, Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia;	and cryogenic
Vladimir I. Andreev, Doctor of Technical Science, Professor, Head of the Department, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russia;	equipment, air
Ganapi J. Akhmedov, Doctor of Technical Science, Professor, Head of the Department, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia;	conditioning systems and
Muhtaritdin M. Batdalov, Doctor of Technical Science, Corresponding member of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia;	life support, 2.5.10
Mahir M. Bashirov, Doctor of Technical Science, Professor, Azerbaijan Technical University, Baku, Azerbaijan;	(05.04.13) - Hydraulic
Alexey N. Davidiyuk, Doctor of Technical Science, Honored Builder of Russia, Director, Gvozdev NII ZHB, JSC «SIC Construction», Moscow, Russia;	machines and
Alexander P. Ivanov, Moscow Institute of Physics and Technology (State University), Dolgoprudny, Russia;	hydropneumatic units,
Vladimir G. Kazachek, Doctor of Technical Science, Professor, Senior researcher, Ataev Institute of Dwelling - NIPTIS Director of Mobile diagnostics in construction, Minsk, Republic of Belarus;	2.3.1 (05.13.01)-System
Nicholay I. Kargin, Doctor of Technical Science, Professor, Vice Rector, Deputy Director of the Institute for Functional Nuclear Electronics, National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia;	analysis, management
Dmitry N. Kobzarev, Doctor of Technical Sciences, Professor, Institute of Geothermal Problems, Daghestan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Makhachkala, Russia;	and information
Alexander A. Krugljakov, Doctor of Technical Science, Professor, General Director Wissenschaftliche Beratung und Handelsvertretung, Berlin, Germany /Deutschland;	processing (By
Vladimir M. Kutuzov, Doctor of Technical Science, Professor, President St. Petersburg Electrotechnical University «LETI», Saint-Petersburg, Russia;	Branches) (Technical
Arkady N. Larionov, Doctor of Economics, Professor, General Director LLC Research Center «Strategy», Moscow, Russia;	Sciences), 2.3.3.
Igor E. Lobanov, Doctor of Technical Science, Leading Researcher, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia;	(05.13.06) - Automation
Magomed Kh. Magomedov, Doctor of Mathematics and Physics, General Director, "SAUNO" Ltd. Moscow, Russia;	and management of
Khasan N. Mazhiev, Doctor of Technical Science, Professor, Millionshchikov Grozny State Oil Technical University, Grozny, Russia;	technological processes
Mher V. Markosyan, Doctor of Technical Sciences, Professor, Director of Yerevan Research Institute of Communication Facilities, Yerevan, Republic of Armenia;	and production (By
Vladimir B. Melekhin, Doctor of Technical Science, Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia;	Branches), 2.3.4.
Aslan G. Mustafayev, Doctor of Technical Science, Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia;	(05.13.10) - Management
Gregory V. Nesvetaev, Doctor of Technical Science, Professor, Head of Construction Technologies Department, Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia;	in social and economic
Eugene A. Rogozin, Doctor of Technical Science, Professor, Voronezh Institute of the Ministry of the Interior of Russia, Voronezh, Russia;	systems, 2.3.7.
Tazhudin E. Sarkarov, Doctor of Technical Science, Professor, Head of the Department, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia;	(05.13.12) - Design
Gadzhimet K. Safaraliyev, Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Scientific Director of the «Microelectronics and Nanotechnology» Research Institute, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia;	automation systems (By
Alexander B. Sulin, Doctor of Technical Science, Professor, Corresponding member, MAX, Institute of Industrial and Marine Medicine of Federal Medical and Biological Agency, St. Petersburg, Russia;	Branches), 2.3.5
Valery I. Finayev, Doctor of Technical Science, Professor, Head of the Department, Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia;	(05.13.18)- Mathematical
Gadzhimurad N. Khadzishalapov, Doctor of Technical Science, Professor, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia;	modeling, numerical
Boris I. Shakhhtar, Doctor of Technical Science, Professor, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia.	methods and program
Editorial council	complexes (Technical
Chairman of the editorial council:	Sciences), 2.3.6.
Boris A. Yakimovich, Doctor of Technical Science, Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia.	(05.13.19) - Methods and
The co-chairs of the editorial council:	systems for information
Konstantin M. Ivanov, Doctor of Technical Science, Professor, Rector, Ustinov Baltic State Technical University «VOENMECH», Saint-Petersburg, Russia;	security, information
<u>Tagir A. Ismailov</u> , Doctor of Technical Science, Professor, President, Daghestan State Technical University, Makhachkala, Russia;	security, 2.1.3.
Vladimir M. Kutuzov, Doctor of Technical Science, Professor, President St. Petersburg Electrotechnical University «LETI», Saint-Petersburg, Russia;	(05.23.03) - Heat supply,
Members of the Editorial Board:	ventilation, air
Mustafa B.-O. Babanly, Doctor of Technical Science, Professor, Rector, Azerbaijan State University of Oil and Industry, Baku, Azerbaijan;	conditioning, gas supply
Islam I. Djanzakov, Doctor of Technical Science, Professor, Corresponding member, SRA RK, Academician of MANEB, Atyrau, Republic of Kazakhstan;	and lighting (Technical
Sergey I. Timoshin, Doctor of Physics and Mathematics, Academician of the Belarusian Academy of Engineering, Professor, Rector, Sukhoi Gomel State Technical University, Gomel, Republic of Belarus;	Sciences), 2.1.5
Vyacheslav M. Khachumov, Doctor of Technical Science, Professor, Head of laboratory, Institute for Systems Analysis of RAS, Moscow, Russia;	(05.23.05) Building
Alexey G. Yakunin, Doctor of Technical Science, Professor, Head of the Department, Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia.	materials and products,
	2.1.9 (05.23.17)
	Construction mechanics,
	2.1.5 (05.23.19) -
	Ecological safety of
	construction and urban
	economy
	Herald of Daghestan
	State Technical
	University. Technical
	Science.Vol. 48, No.2
	Makhachkala,
	2021–136p.
	Published by Decision of
	the Academic Council
	Daghestan State
	Technical University
	Edition and Publisher
	Address: 70 I. Shamil
	Ave., Makhachkala, the
	Republic of Daghestan
	367026, Russia.
	Daghestan State
	Technical University
	Tel./fax (8722)623715
	(8722)623964

CONTENTS

POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL MECHANICAL ENGINEERING9

A.Yu. Baranov, M.I. Davydenko, Ye.V. Sokolova, O.A. Filatova

INCREASING THE PUMP ENERGY EFFICIENCY OF THE SYSTEM FOR DISCHARGING LIQUEFIED NATURAL GAS FROM LARGE-CAPACITY STORAGE FACILITIES VIA DESIGN IMPROVEMENT9

COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT20

G.K. Aslanov, T.G. Aslanov

AVERAGE ERROR DETERMINATION IN THE CALCULATION OF EARTHQUAKE EPICENTER COORDINATES20

A.V. Batskikh, V.V. Konobeevskikh, S.V. Efimov

METHODS FOR ASSESSING THE EFFICIENCY OF ACCESS CONTROL SUBSYSTEMS AT INFORMATIZATION FACILITIES OF INTERNAL AFFAIRS BODIES AND ASPECTS OF THEIR IMPROVEMENT29

S. Rodriguez Vasquez, N.V. Mokrova

HYBRID ALGORITHMS FOR GEOSPATIAL ANALYSIS OF DAM LOCATION POINTS IN PROTECTIVE TASKS FOR PROTECTED AREAS40

Yu. S. Trufanov

DEVELOPMENT OF AUTOMATED BALANCE FLOW-SHEETS IN REFINERY COMMODITY AND FEEDSTOCK DEPOTS50

R.A. Khuramshina, V.V. Sokolova

MATHEMATICAL MODELLING OF ULTRASONIC TREATMENT OF ASPHALTENE DEPOSITS .60

BUILDING AND ARCHITECTURE73

A.S. Gavrilov, A.E. Sergeev

MEASURES TO IMPROVE ENERGY EFFICIENCY OF BUILDING UTILITY SYSTEMS73

S.S. Dobrosmyslov, N.N. Rozhkova, A.F. Rozhkov, M.A. Perkova, S.A. Aliev

INFLUENCE OF AIR LAYER ON TEMPERATURE AND HUMIDITY CHARACTERISTICS OF OUTER ENVELOPE STRUCTURE WITH INTERNAL HEAT INSULATION81

D.F. Karpov, M.V. Pavlov

ASSESSING THERMAL PROPERTIES OF ENCLOSING STRUCTURES OF CONSTRUCTION FACILITIES BY ANALYSIS OF THERMOGRAMS92

A. A. Krutilin, T. V. Krapchetova, N.A. Inkova, O.K. Pakhomova RESEARCH OF PHYSICAL AND CHEMICAL PROCESSES ASSOCIATED WITH CORROSION OF CEMENTS (“CAKING”) IN DAMPY WET AIR	103
--	-----

T.A. Rafalskaya EFFECTS OF MOISTURE ACCUMULATION IN OUTER WALLS ON THERMAL MODE OF PREMISES IN CASE OF EMERGENCY HEAT SUPPLY	113
---	-----

O.M. Ustarkhanov, Kh. M. Muselemov, Kh.M. Gapparov STRESS-DEFORMED STATE OF A THREE-LAYER STRUCTURE TAKING INTO ACCOUNT THE HYPOTHESIS OF CUBIC DISPLACEMENT PATTERN OVER THE THICKNESS OF A FILLER	124
--	-----

FORMATTING REQUIREMENTS FOR PAPERS	133
---	------------

Для цитирования: А.Ю. Баранов, М.И. Давыденко, Е.В. Соколова, О.А. Филатова. Повышение энергоэффективности насоса системы отгрузки сжиженного природного газа из крупнотоннажных хранилищ путем модернизации конструкции. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2021; 48 (2): 9-19. DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-2-9-19

For citation: A.Yu. Baranov, M.I. Davydenko, Ye.V. Sokolova, O.A. Filatova. Increasing the pump energy efficiency of the system for discharging liquefied natural gas from large-capacity storage facilities via design improvement. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2021; 48 (2): 9-19. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-2-9-19

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

УДК 621.642.86

DOI: 10.21822/2073-6185-2021-48-2-9-19

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ НАСОСА СИСТЕМЫ ОТГРУЗКИ СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА ИЗ КРУПНОТОННАЖНЫХ ХРАНИЛИЩ ПУТЕМ МОДЕРНИЗАЦИИ КОНСТРУКЦИИ

А.Ю. Баранов¹, М.И. Давыденко², Е.В. Соколова³, О.А. Филатова⁴

¹⁻³Национальный исследовательский университет ИТМО,

¹⁻³197101, Санкт-Петербург, пр. Кронверкский, 49, Россия,

⁴Научно-производственное предприятие «КРИОН»,

⁴197375, г. Санкт-Петербург, Макулатурный проезд, 4, лит. А, пом. 120-121, Россия

Резюме. Цель. Определить наиболее актуальный способ повышения энергоэффективности системы отгрузки сжиженного природного газа (СПГ) из крупнотоннажных хранилищ. **Метод.** Использована методика анализа существующих систем отгрузки СПГ из накопительных емкостей для выявления критических (аварийных) элементов системы, подлежащих модернизации, и возможных вариантов модернизации конструктивных элементов. **Результат.** Проанализирована работа системы отгрузки СПГ из накопительных емкостей, описаны основные характеристики работы системы. Рассмотрены основные проблемы, связанные с проектированием и конструированием погружных насосов, цели и задачи разработки новых конструкций погружных насосов. Были изучены основные виды и типы погружных насосов для СПГ, их разновидности, а также виды приводов с целью выбора наиболее оптимального нового варианта модернизации погружных насосов для систем отгрузки СПГ из танкеров. В дальнейшем необходимо произвести расчет гидротурбины в целях определения ее геометрических параметров, а также расчет режимов работы рабочего колеса турбины в сообщении с рабочим колесом центробежного насоса. **Вывод.** Анализ опыта эксплуатации хранилищ показывает, что СПГ насосы являются наиболее критичным узлом, который значительно повышает производственные риски. Таким образом, в качестве метода повышения энергоэффективности системы отгрузки СПГ из накопительных емкостей была выбрана модернизация конструкции погружного насоса СПГ (ПНСПГ). На основании рассмотренных преимуществ и недостатков конструктивных элементов существующей конструкции ПНСПГ был определен наиболее оптимальный метод модернизации – замена электрического привода насоса на альтернативный.

Ключевые слова: сжиженный природный газ; крупнотоннажные хранилища; погружной насос отгрузки; центробежный насос гидравлическая турбина

INCREASING THE PUMP ENERGY EFFICIENCY OF THE SYSTEM FOR DISCHARGING LIQUEFIED NATURAL GAS FROM LARGE-CAPACITY STORAGE FACILITIES VIA DESIGN IMPROVEMENT

A.Yu. Baranov¹, M.I. Davydenko², Ye.V. Sokolova³, O.A. Filatova⁴

¹⁻³ITMO National Research University,

¹⁻³49 Kronverksky Ave., Saint Petersburg 197101, Russia

⁴KRION R&D enterprise,

⁴4A Makularurny Lane, Units, 120–121, Saint Petersburg 197375, Russia

Abstract. Objective. To determine the most relevant way to improve the energy efficiency of the system for discharging liquefied natural gas (LNG) from large-capacity storage facilities. **Methods.** The method of analysis of existing systems for LNG discharge from storage tanks was used to identify critical (emergency) elements of the system to be improved and possible options of improving structural elements. **Results.** The operation of the system for discharging LNG from storage tanks was analysed and its main characteristics were described. Main problems associated with designing and building borehole pumps, as well as goals and tasks of designing new borehole pump structures were studied. The main types of LNG borehole pumps, their varieties, and types of drives were studied to choose the most optimal new option of improving pumps for systems for discharging LNG from storage tanks. Further, it will be necessary to calculate geometric parameters of the hydroturbine and operation modes of its wheel being in connection with the centrifugal pump wheel. **Conclusion.** Experience of using storage facilities shows that LNG pumps are the most critical units significantly increasing production risks. Therefore, the LNG borehole pump design improvement was chosen as a method to increase the energy efficiency of the system for discharging LNG from large-capacity storage facilities. Based on the considered advantages and disadvantages of structural elements of the existing LNG borehole pump design, we chose the replacement of the electric pump drive with an alternative one as the most optimal improvement method.

Keywords: liquefied natural gas; large-capacity storage facilities; borehole discharge pump; centrifugal pump of hydroturbine

Введение. Российская Федерация активно развивает сферу производства, транспортирования и реализации сжиженного природного газа (СПГ). Это сопряжено с постановкой технологических задач, решенных странами - экспортерами СПГ 20 лет назад. Причиной хронологического отставания Российской Федерации от поставщиков СПГ стало наличие большой сухопутной границы, что позволяет снабжать большое количество потребителей трубопроводным природным газом.

По прогнозам экспертов, к 2025 г. годовое производство СПГ сможет достичь порядка 400 млн. т, что будет соответствовать 10 % объема современного рынка сырой нефти [1-6].

На всех существующих крупнотоннажных заводах СПГ применяются холодильные циклы, которые можно разделить на три основных типа:

- каскадный процесс (например, StatoilLinde MFC);
- охлаждение на смешанном хладагенте (цикл Клименко – PRICO);
- с предварительным охлаждением природного газа (например, технологии компании Axens по циклу Liquefi n).

Анализ существующих проектов крупнотоннажных заводов СПГ, эксплуатируемых, строящихся и проектируемых (проекты «Сахалин-2», «Ямал СПГ», «Дальневосточный СПГ», «Владивосток-СПГ», «Печора СПГ», «Балтийский СПГ»), определяет удельную стоимость завода СПГ в пределах от 1200 до 1600 \$ на тонну продукции. С накоплением строительного и технологического опыта строительства происходит снижение удельной стоимости заводов СПГ

в основном за счет [1]: увеличения мощности технологических линий сжижения природного газа; наращивания производства мощных газовых турбин и компрессоров.

На рынке СПГ Россия находится в роли страны «догоняющей» от стран, долгое время работающих на рынке СПГ, и из данного положения можно извлечь определенные преимущества. Например, изучение технологических ошибок, допущенных при разработке технологий СПГ, позволит значительно сэкономить временные и материальные ресурсы. Анализ передовых технологий и методов сжижения, хранения и транспортирования можно осуществить, используя открытое информационное пространство. Обобщение и адаптация опыта производства СПГ позволят создать конкурентоспособные технологии, основанные на использовании отечественных компонентов, направленными на решение конкретных проблем, существующих в отрасли.

По данным зарубежных перевозчиков, приблизительная стоимость фрахта и всех операционных затрат на один рейс метановоза с объемом сжиженного газа в 162 тысячи м³ из Техаса до Великобритании (протяженность около 8000 км) составляет 2,4 миллиона долларов [2]. Российские экономисты оперируют в основном удельными затратами на тонну СПГ, которые также представляются достаточно значительными [3].

Высокая стоимость транспортирования СПГ морскими судами значительно отражается на организации перевозок. Время простоя судна, включающее в себя погрузку и разгрузку танков, не должно превышать 24 часов. Это значит, что к моменту прибытия метановоза в хранилище необходимо накопить до 200 тысяч м³ СПГ. Для заводов производительностью порядка 10 млн. тонн СПГ в год суточная производительность составляет около 6,5 тысяч м³, т.е. выдача продукции в количестве 200 тысяч м³ возможна через каждые 3-4 дня. Для этого завод имеет 4 хранилища объемом 40-45 тысяч м³ каждое. Такие хранилища имеют колоссальные размеры: диаметр до 80 м, высота до 50 м. Эти сооружения не имеют аналогов в других областях криогенной техники.

Сегодняшний рынок резервуаров хранения и транспортировки сжиженного газа очень разнообразен. Однако доминируют в нем емкости для длительного хранения, которые принадлежат покупателю. Используются наземные и подземные железобетонные резервуары. Наиболее популярны резервуары мембранного типа. Во всех случаях, за исключением хранения в горных выемках, для отгрузки СПГ используются погружные центробежные насосы, способные откачать из хранилища до 90-95 % сжиженного газа [3].

Постановка задачи. Использование погружных насосов в системе бункеровки СПГ обусловлено нерентабельностью линии отбора жидкости через боковую теплоизоляционную конструкцию танкера или резервуара. Погружной насос удален от окружающей среды на 30 м, что снижает теплопередачу окружающей среды и позволяет использовать один трубопровод для подачи и отбора жидкости из резервуара [4].

Использование погружного насоса в системах бункеровки создает ряд эксплуатационных проблем. Насос должен создавать достаточный напор для выталкивания СПГ из резервуара. Слой СПГ толщиной 25 м создает гидростатическое давление более 0,1 МПа. Для подъема с глубины 30 м, насос должен иметь напор более 0,2 МПа. Расход СПГ из одного резервуара составляет 3 тысячи м³/час. Номинальный расход СПГ обеспечивается за счет работы двух насосов с подачей 1250-2000 м³/час (0,3 – 0,55 м³/с).

Эксплуатация выявила ряд преимуществ погружных криогенных насосов, в частности было преодолено негативное влияние уплотнений вращающихся элементов, которое вызывало утечки перекачиваемой жидкости; упрощена конструкция подшипников; электродвигатель в криогенной жидкости работал очень устойчиво. Идеальные условия отвода теплоты, выделяемой в обмотках электродвигателя за счет испарения части криогенной жидкости, позволили существенно уменьшить габаритные размеры электрического двигателя по отношению к аналогичным насосам, работающих в условиях воздушного охлаждения. Специфические свойства криогенных жидкостей благоприятно сказались на работе подшипников [5]. Несмотря на то, что вязкость криогенных жидкостей сравнительно небольшая, поэтому плохо подходит в каче-

стве смазывающего материала, однако хорошая теплоотводящая способность компенсирует этот недостаток, в связи с чем, продолжительность непрерывной работы подшипников очень велика.

Рабочие колеса погружных насосов имеют закрытую конструкцию с одинарным всасыванием, в которой используется смешанное всасывание потока с использованием осевых и радиальных усилий. Электропривод погружных насосов рассчитан на работу от сети с частотой 50-60 Гц. Для управления погружным насосом можно использовать частотно-регулирующий привод, что позволит изменять скорость вращения рабочего колеса насоса и регулировать производительность и создаваемый насосом напор.

Исходя из эксплуатационных характеристик существующих марок погружных насосов для отгрузки СПГ, основным видом данных насосов является центробежный насос с электрическим приводом. Однако наличие электропривода значительно повышает аварийность системы, насосы требуют полной ревизии и при поломке или отказе не подлежат ремонту и требуют полного вывода из эксплуатации. Кроме того, в большинстве из них используются подшипники качения, что также повышает аварийность системы и значительно снижает ее ремонтпригодность.

Нельзя не отметить то, что при погружении агрегата и насоса в криогенную жидкость в значительной степени устраняются неизбежные проблемы с уплотнением вала и утечками перекачиваемой жидкости, так как весь агрегат находится в криогенной емкости. Это обстоятельство значительно упрощает эксплуатацию погружных насосов.

Анализ опыта эксплуатации хранилищ показывает, что СПГ насосы являются наиболее критичным узлом, который значительно повышает производственные риски. Необходимо выявить наиболее «слабые» места центробежного насоса для СПГ и разработать всевозможные варианты повышения его надежности. Это положение позволяет подойти к вопросу повышения надежности глубже, т.е. с учетом возможности внесения в конструкцию насоса принципиальных изменений, которые могут в последствие использоваться при производстве отечественных агрегатов.

В настоящее время большинство оборудования, используемого на действующих объектах крупнотоннажного производства СПГ – импортное. Зарубежные насосы относятся к насосам с вертикальной компоновкой и рабочими колесами центробежного или диагонального типа. Широкое использование центробежных насосов в качестве погружных обусловлено большим числом их типоразмеров.

При создании насосов для СПГ преследуются следующие цели [6]:

- разработка отечественных полей О-Н насоса подачи СПГ;
- достижение энергетических и кавитационных показателей на уровне мировых аналогов;
- достижение в рамках одного типоразмера насоса устойчивой работы в широком диапазоне подач для оптимального времени заполнения системы СПГ;
- разработка насосов для СПГ в соответствии с высокими требованиями мировых стандартов надежности, промышленной и экологической безопасности;
- разработка насосов с высокими эксплуатационными качествами и увеличенным межремонтным периодом.

Методы исследования. Публицистические исследования за период ретроспекции 20 лет для патентов и 10 лет для публикаций показывают, что при разработке отечественных насосов для перекачивания СПГ актуальными задачами (на решение которых обычно направлены разработки известных в насосостроении фирм) являются [7]:

- усовершенствование конструкции путем использования пред-включенного колеса для компенсации силы давления на подшипниковые опоры с целью увеличения их ресурса (фирма J. C. Carter, США);

- усовершенствование пред-включенного колеса с целью повышения эффективности работы насоса при низком расположении в корпусе танка (J. C. Carter);
- усовершенствование конструкции путем использования рабочего колеса центробежного насоса для уменьшения осевого давления на вал и увеличения ресурса подшипниковых опор (J. C. Carter).

Из содержания проанализированных патентов следует, что конструирование погружных насосов идет по пути усовершенствования отдельных деталей насоса. Патентные исследования также показали, что в качестве дополнительных источников при окончательной доработке конструкторского проекта могут в известной степени использоваться патенты иностранных фирм, у которых истек срок действия [8].

Для решения задачи модернизации конструкции ПНСПГ необходимо выполнить следующие работы:

- а) изучить условия работы погружных насосов в хранилищах СПГ;
- б) оценить соответствие всех типов насосов этим условиям;
- в) проанализировать принципы, снижающие надежность работы насосов;
- г) проанализировать энергетическую эффективность ПНСПГ.

Для анализа схемы производства СПГ из природного газа (далее – ПГ) под давлением 5 МПа используем подробно описанный в литературе проект завода «Балтийский СПГ».

На заводе функционируют две технологические линии выдачи газа, каждая из которых производит $5 \cdot 10^6$ тонн СПГ в год, расход СПГ в линии выдачи в емкость составляет 320 кг/с. Отгрузка СПГ в танкеры осуществляется периодически.

Для накопления и хранения продукции в состав завода «Балтийский СПГ» входит четыре накопительные емкости для СПГ, объемом $42,000 \text{ м}^3$ каждая [9].

Типовая технологическая схема производства СПГ представлена на рис. 1.

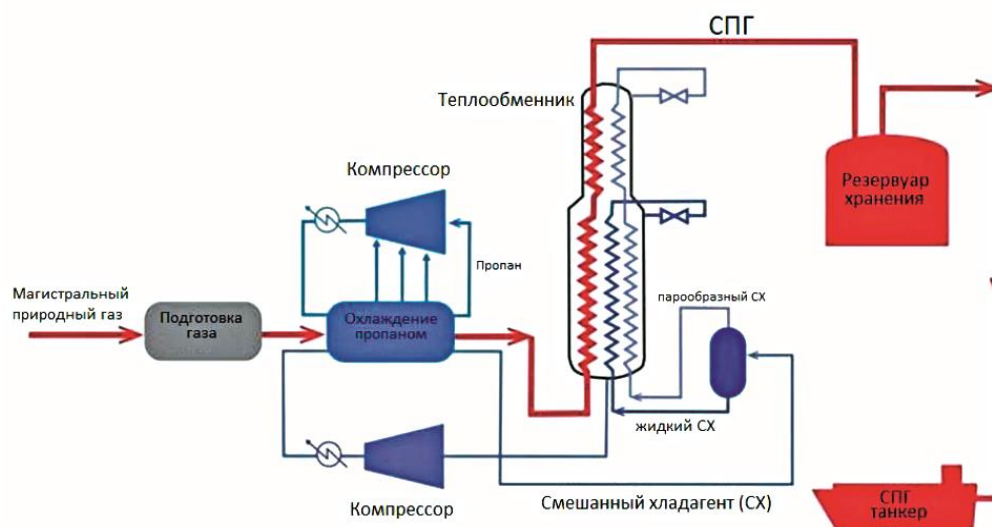


Рис. 1. Технологическая схема производства сжиженного природного газа (СПГ)

Fig. 1. Technological scheme for the production of liquefied natural gas (LNG)

Причиной использования погружных насосов в системе бункеровки СПГ считается низкая энергетическая эффективность отбора жидкости через боковую теплоизоляционную конструкцию резервуара.

Такая линия отбора жидкости играет роль «теплового моста» между СПГ и окружающей средой [9]. Накопление производного СПГ продолжается в течение двух суток. Затем начинается фаза отгрузки СПГ в танкер-газовоз. За время накопления уровень жидкости в хранилище увеличивается от минимального до максимального значения (около 27 м), благодаря чему в четырех хранилищах накапливается порядка 17640 тонн СПГ. Как правило, отгрузка СПГ длится не более 24 часов. Чтобы отгрузить накопленный СПГ, необходимо обеспечить расход СПГ не менее 536 кг/с. Параллельно процессу отгрузки СПГ из резервуара продолжается пода-

ча производственного СПГ в емкости. В целом в танкер перемещается до 200 000 м³ СПГ. После этого завод вновь переходит в фазу накопления СПГ.

Учитывая, что на основании опыта эксплуатации ПНСПГ являются наиболее критичным узлом, в емкостях устанавливают 2-3 резервных ПНСПГ для использования во внештатных ситуациях. Расчетная мощность привода насосного агрегата одной емкости составляет порядка 300 кВт. С учетом того что КПД центробежного насоса 70%, 30% мощности привода ПНСПГ в виде теплоты выделяются в емкость накопления СПГ. Из-за подвода теплоты, выделенной в ПНСПГ за время отгрузки, до 30 тонн СПГ затрачиваются на компенсацию этих теплопритоков.

Использование электродвигателя в качестве привода ПНСПГ создает ряд дополнительных проблем:

- проблема смазки трущихся частей;
- проблема подачи электроэнергии в слой СПГ на глубину до 50 метров;
- низкая устойчивость лакокрасочных материалов, проводов к криогенным температурам и т.д.

Таким образом, подтверждается предположение о том, что насосы являются наиболее сложными и ненадежными в эксплуатации узлом системы накопления и отгрузки СПГ, что стимулирует стремление найти альтернативные решения, которые позволили бы повысить надежность и энергетическую эффективность этого элемента на заводе СПГ.

Обсуждение результатов. Анализируя существующие конструкции ПНСПГ, а также основные проблемы, связанные с их эксплуатацией в условиях отгрузки и накопления СПГ, можно определить возможность внесения в конструкцию насоса принципиальных изменений, которые могут впоследствии способствовать исключению существующих эксплуатационных недостатков ПНСПГ и использоваться при производстве отечественных агрегатов.

Анализ характеристик, а также преимуществ и недостатков различных видов насосов на основании данных научно-технической литературы показал, что наиболее оптимальным для использования в качестве насоса в условиях работы с СПГ является центробежный насос. Учитывая, что порядка 95% всех используемых погружных насосов на сегодняшний день в качестве рабочего органа имеют рабочее колесо центробежного насоса, а также ввиду отсутствия альтернативы среди других видов насоса по совокупности удовлетворительных значений, определяющих характеристики, рассматривать возможность изменения вида насоса в конструкции ПНСПГ не представляется возможным. Использование альтернативных видов рабочих колес может привести к снижению общей эффективности работы системы, возникновению дополнительных аварийных ситуаций и повышению эксплуатационных издержек.

Учитывая отсутствие вариантов замены рабочего колеса в составе ПНСПГ на альтернативное – центробежному, повышение эффективности работы системы можно произвести посредством замены электрического привода. Электропривод, погруженный в жидкости, приводит к снижению ремонтпригодности – в случае поломки любого узла требуется полная замена насосного агрегата [10, 11]. В конструкции электродвигателя присутствует множество трущихся частей, работа которых в условиях сверхнизких температур ненадежна и значительно повышает аварийность системы в целом.

Центробежные насосы используют электрический, гидравлический, пневматический, механический приводы [11]. Использование механического привода для погружных насосов СПГ может привести к возникновению значительных трудностей. Основные проблемы использования связаны с тем, что для эксплуатации механического привода в системе погружных насосов необходимо опустить шкиф привода на 27 м, что является невозможным. Ввиду этого использование механического привода для погружных насосов СПГ является ненадежным, и в дальнейшем не будет рассматриваться в качестве варианта модернизации.

Пневматический привод является технологией с большой историей использования, имеющей как положительные, так и отрицательные аспекты.

Схема устройства пневматического привода насоса достаточно сложна, состоит из управляющих, распределительных и исполнительных устройств. Принцип работы пневматического привода состоит в следующем: воздух, поступающий в компрессор, последовательно сжимается, охлаждается затем направляется в пневмодвигатель и передает свою внутреннюю энергию поршню, за счет чего последним производится механическая работа. Во избежание скачков давления в конструкции пневматического привода используется ресивер. В качестве рабочего элемента в пневматических приводах могут использоваться поршни, мембраны или сильфоны. Пневматические приводы, использующие в своих конструкциях поршни, относятся к пневмоцилиндрам [12].

Как видно из рассмотренных достоинств и недостатков пневматического привода, его использование в качестве привода для погружных насосов СПГ систем отгрузки невозможно. Это обусловлено в первую очередь непригодностью применения пневматического привода в условиях низких температурах, ввиду обмерзания. Кроме того, сжатый газ при помещении в такую холодную среду будет склонен к конденсации и засорению насоса. Именно поэтому пневматический привод также не будет рассматриваться далее в качестве варианта модернизации привода для погружного насоса СПГ.

Недостаточно изученным вариантом для использования в качестве привода погружного насоса СПГ остается гидравлический привод. Принцип действия гидроприводов основывается на перемещении исполнительного органа за счет движения жидкости – минерального масла, воды и т.д.

Гидроприводы подразделяются на гидродинамические и объемные. Объемный гидропривод способен на большее усилие при прочих равных условиях, чем гидродинамический, кроме того, он компактнее и легче. Именно поэтому объемные гидроприводы применяются сейчас в большинстве вариантов гидронасосов [13 - 15].

Для погружных насосов СПГ использование объемного гидропривода наиболее оптимально, так как создание достаточно большой скорости переохлажденной жидкости в резервуаре для гидродинамического насоса невозможно, а наличие избыточного давления внутри резервуара обеспечит создание необходимого усилия на исполнительный механизм объемного гидропривода. При управлении объемным гидроприводом производится изменение скорости движения поршня за счет изменения частоты вращения приводящего двигателя.

Использование гидравлического привода для погружных насосов позволит исключить высокую аварийность, необходимость использования подшипников, а также обеспечит использование в качестве рабочей жидкости перекачиваемый из танкера СПГ. Таким образом, в качестве модернизации конструкции ПНСПГ заменим электрический привод на гидравлический. Стоит отметить, что технологическая схема производства СПГ содержит скрытый источник механической энергии, который можно использовать для привода ПНСПГ (рис. 2).

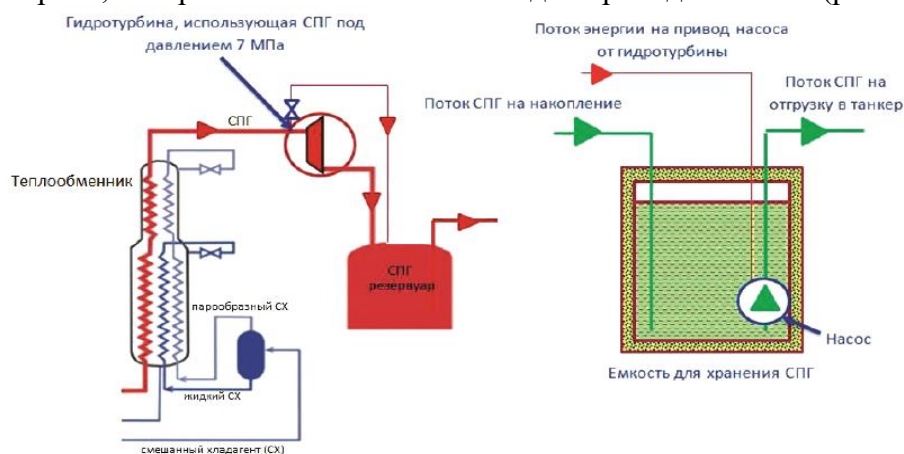


Рис. 2. Гидротурбина для электропривода погружного насоса сжиженного природного газа (ПНСПГ)
Fig. 2. Hydraulic turbine for electric drive of a submersible pump of liquefied natural gas (LNGP)

«Жидкостной детандер» (гидротурбина) снижает давление потока СПГ, равное давлению магистрального потока ПГ (6,5 МПа), до давления, близкому к атмосферному. Поток жидкости совершает механическую работу над гидротурбиной, которая в свою очередь вращает электрогенератор и возвращает часть энергии, затраченной на сжатие ПГ при подаче в магистральный газопровод. Поток СПГ под давлением 7 МПа обладает значительным запасом количества механической энергии, которую можно использовать для привода в движение рабочего колеса ПНСПГ.

Поток жидкости отбирается через регулирующий клапан в дополнительную магистраль, которая проходит параллельно основной магистрали подачи жидкости в криогенную накопительную цистерну (емкость) и находится с ней в одной изоляции, что снижает подвод теплоты к этому дополнительному технологическому потоку. Соответственно, в насосный агрегат СПГ приходит в недогретом состоянии, т.е. его свойства соответствуют свойствам традиционной жидкости (воде).

Если подать этот поток на гидротурбину, соосно размещенную с ПНСПГ, вся энергия жидкостного потока перейдет в энергию вращения рабочего колеса турбины и, соответственно, в энергию вращения рабочего колеса насоса. После сброса давления поток СПГ может быть направлен либо в накопительную емкость, либо в трубопровод выдачи СПГ в танкер [16, 17].

Управление гидроприводом обеспечивается запорной арматурой. Использование СПГ в качестве рабочей жидкости исключает проблемы уплотнения подшипников, так как переток жидкости со стороны привода на сторону нагнетания не ухудшают работу насоса.

ПНСПГ с приводом от гидротурбины представляется наиболее оптимальным вариантом исключения эксплуатационных недостатков. Примерная схема такого агрегата приведена на рис. 3.

Колесо насоса и колесо гидротурбины размещены соосно и находятся на дне цистерны. Поток СПГ раскручивает приводящее колесо и переходит в линию нагнетания, где смешивается с основным потоком СПГ, который засасывается в нагнетательное колесо ПНСПГ через спускные отверстия, расположенные в нижней части насоса. Весь агрегат находится в слое СПГ, поэтому перетечки по уплотнениям оси насоса существенного влияния на работы ПНСПГ не оказывают.

Несомненным преимуществом такой схемы является то что, приводящая и подающая жидкости представляю собой одно и то же вещество, что снимает проблемы уплотнения между расширительной частью турбины и нагнетательной частью насоса.

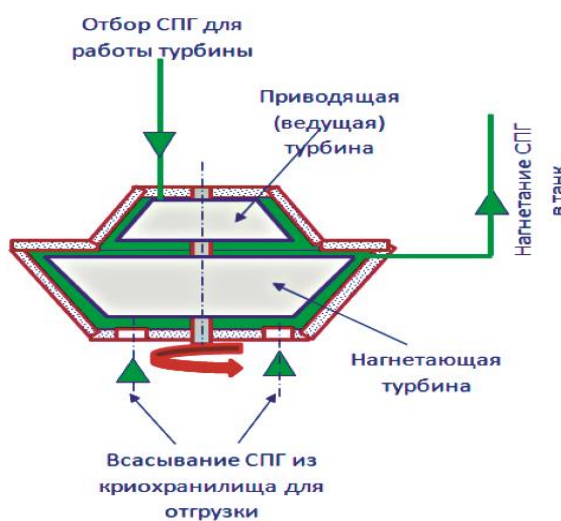


Рис. 3. Схема погружного насоса сжиженного природного газа (ПНСПГ) с приводом от гидротурбины

Fig. 3. Diagram of a submersible pump of liquefied natural gas (LNGP) driven by a hydraulic turbine

Более того, подшипники насоса также могут работать, используя в качестве смазки сам СПГ.

Стоит также отметить, что одним из преимуществ использования гидротурбины в качестве привода ПНСПГ является то, что механическая работа, совершаемая жидкостью над колесом, передается на колесо насоса и потери энергии, присущие электродвигателю, отсутствуют. Соответственно, уменьшаются потери СПГ от испарения [18]. Кроме того, исключаются проблемы, связанные с подачей электроэнергии через слой СПГ.

На сегодняшний день уже существуют гидравлические турбины, работающие на криогенных жидкостях. Такие машины имеют расположенные в осевом направлении составные части, работающие при температуре ниже температуры окружающей среды. Криогенные турбины используют радиальный впуск текучей среды, что снижает вероятность вскипания жидкости и повышает надежность работы турбины [19, 20].

Согласно характеристикам существующих видов гидротурбин, работающих на криогенной жидкости, а также к приводу ПНСПГ в части требуемого напора и выдачи СПГ, можно сделать вывод, что наиболее оптимальным вариантом является использование радиально-осевой гидротурбины в качестве привода центробежного ПНСПГ.

Вывод. В связи со сложившейся политической ситуацией, а также очевидной перспективой развития мирового рынка СПГ и актуальностью совершенствования данной отрасли промышленности, развитие собственных российских технологий и конструкций обеспечит не только стабильное положение на рынке, но и позволит выйти в лидеры.

Модернизация существующих конструкций и технологий на основании опыта эксплуатации стран-производителей СПГ поможет России стать страной-производителем передовых СПГ-технологий, характеризующихся новизной, энергоэффективностью и высокой надежностью.

Для достижения поставленных целей в данной статье были рассмотрены основные проблемы, связанные с проектированием и конструированием погружных насосов, цели и задачи разработки новых конструкций погружных насосов.

Были изучены основные виды и типы погружных насосов для СПГ, их разновидности, а также виды приводов с целью выбора наиболее оптимального нового варианта модернизации погружных насосов для систем отгрузки СПГ из танкеров. По результатам анализа наиболее оптимальным для дальнейшего развития является комплектация центробежных погружных насосов гидравлическим приводом, позволяющим использовать СПГ в качестве рабочей жидкости.

В дальнейшем необходимо произвести расчет гидротурбины в целях определения ее геометрических параметров, а также расчет режимов работы рабочего колеса турбины в сообщении с рабочим колесом центробежного насоса.

Библиографический список:

1. Рачевский Б.С. Технико-экономическая оценка проектов производства и потребления сжиженного природного газа // Журнал «Повышение надежности и безопасности объектов газовой промышленности». 2017. с.225 – 233.
2. Аналитический бюллетень // Нефтегазодобывающая и нефтеперерабатывающая промышленность: Тенденции и прогнозы. Выпуск №19. 2018.
3. Звуйковский Н.А. Сдержанный оптимизм: Обзор российских СПГ- проектов // Oil & Gas Journal Russia. 2016. с.50–54.
4. Голубева И.А., Мещерин И.В. Производство сжиженного природного газа: вчера, сегодня, завтра // Мир нефтепродуктов. 2016. № 6, с. 4–13.
5. David A. Coyle, Vinod H. Patel Process and pump services in the LNG industry. 2018. pp.179-185.
6. Wahl F.A. LNG pumps for floating units // Proceedings LNG17. Poster Session. Houston, Texas. USA. 2013.
7. Соколов Е.В., Ключкин О.Н. Отчет о патентных исследованиях по ОКР «Разработка насосного оборудования для систем перекачивания сжиженного природного газа» ОАО «ЛГМ». 2012.
8. Соколов Е.В., Солодченков В.Ф. Опыт разработки насосного оборудования для систем перекачивания сжиженного природного газа // Журнал «Судостроение». 2016. с.45-50.

9. Проект Балтийского СПГ на сайте «Газпрома» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.gazprom.ru/about/production/projects/lng/baltic-lng>
10. Teregulov R.K. Perfection of technologies for production and storage of liquefied natural gas: Candidate thesis (engineering) // Ufa State Petroleum Technological University. 2009.
11. Rush S., Hall L. Tutorial on cryogenic submerged electric motor pump 2018. pp.57-62.
12. Weisser G.L. Modern Submersible Pumps for Cryogenic Liquids // Word Pump, January. 2004.
13. Осипов П.Е. Гидравлика, гидравлические машины и гидропривод: Уч. Пособие. 3-е изд., перераб. и доп. - М.: Лесная промышленность. 2011.
14. Weisser G.L. Modern Submersible Pumps for cryogenic liquids // Word Pump. 2014.
15. Елин В.М., Солдатов К.Н., Соколовский С.М. Насосы и компрессоры 2-е изд., перераб. и доп. // М: Гостоптехиздат. 2015. 98 с.
16. Hylton E.H. State of the Art Submerged cryogenic motor pump and turbine generators // Proceeding of Gastech. Conference, Houston, Texas. 2010.
17. Дурнов П.И. Насосы и компрессоры. // М: Машигиз. 2014. 938 с.
18. Cullen D., Rush S., Madison J. Radial and axial diffusers for submerged electric motor-driven pumps // Word Pumps. 2010.
19. Расширительная турбина, работающая на основе криогенной жидкости [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://findpatent.ru/patent/259/2592691.html>
20. Rush S. Effects of Unbalanced magnetic pull in cryogenic submerged electric motor pumps // Proceedings of the Vibration in fluids machinery conference. 2012.

References:

1. Rachevskiy B.S. Tekhniko-ekonomicheskaya otsenka proyektov proizvodstva i potrebleniya szhizhennogo prirodnogo gaza // Zhurnal «Povysheniye nadezhnosti i bezopasnosti ob'yektov gazovoy promyshlennosti». 2017. s.225 – 233. [Rachevsky B. S. Technical and economic assessment of projects for the production and consumption of liquefied natural gas // Journal "Improving the reliability and safety of gas industry facilities". 2017. pp. 225-233. [(In Russ)]]
2. Analiticheskiy byulleten' // Neftegazodobyvayushchaya i neftepererabatyvayushchaya promyshlennost': Tendentsii i prognozy. Vypusk №19. 2018. [Analytical bulletin // Oil and gas production and oil refining industry: Trends and forecasts. Issue No. 19. 2018. [(In Russ)]]
3. Zvuykovskiy N.A. Sderzhanny optimizm: Obzor rossiyskikh SPG- proyektov // Oil & Gas Journal Russia. 2016. s.50–54. [Svejkovsky N. And. Cautious optimism: an Overview of Russian LNG projects // Oil & Gas Journal Russia. 2016. pp. 50–54. [(In Russ)]]
4. Golubeva I.A., Meshcherin I.V. Proizvodstvo szhizhennogo prirodnogo gaza: vchera, segodnya, zavtra // Mir nefteproduktov. 2016. № 6, s. 4–13. [Golubeva, I. A., I. V. Meshcherin liquefied natural gas Production: yesterday, today, tomorrow // the World of petroleum products. 2016. No. 6, pp. 4-13. [(In Russ)]]
5. David A. Coyle, Vinod H. Patel Process and pump services in the LNG industry. 2018. pp.179-185.
6. Wahl F.A. LNG pumps for floating units//Proceedings LNG17. Poster Session. Houston, Texas. USA. 2013.
7. Sokolov Ye.V., Klyukvin O.N. Otchet o patentnykh issledovaniyakh po OKR «Razrabotka nasosnogo oborudovaniya dlya sistem perekachivaniya szhizhennogo prirodnogo gaza» OAO «LGM». 2012. [Sokolov E. V., Klyukvin O. N. Report on patent research on ROC " Development of pumping equipment for pumping systems of liquefied natural gas "of JSC "LGM". 2012. [(In Russ)]]
8. Sokolov Ye.V., Solodchenkov V.F. Opyt razrabotki nasosnogo oborudovaniya dlya sistem perekachivaniya szhizhennogo prirodnogo gaza // Zhurnal «Sudostroyeniye». 2016. s.45-50. [Sokolov E. V., Solodchenkov V. F. Experience in developing pumping equipment for pumping systems of liquefied natural gas // Journal "Shipbuilding". 2016. pp. 45-50. [(In Russ)]]
9. Projekt Baltiyskogo SPG na sayte «Gazproma» [Elektronnyy resurs]. – Rezhim dostupa: <http://www.gazprom.ru/about/production/projects/lng/baltic-lng> [The Baltic LNG project on the Gazprom website [Electronic resource]. - Access mode: <http://www.gazprom.ru/about/production/projects/lng/baltic-lng>[(In Russ)]]
10. Teregulov, R.K. Perfection of technologies for production and storage of liquefied natural gas: Candidate thesis (engineering) // Ufa State Petroleum Technological University. 2009.
11. Rush S., Hall L. Tutorial on cryogenic submerged electric motor pump 2018. pp.57-62.
12. Weisser G.L. Modern Submersible Pumps for Cryogenic Liquids // Word Pump, January. 2004.
13. Osipov P.Ye. Gidravlika, gidravlicheskiye mashiny i gidroprivod: Uch. Posobiye. 3-ye izd., pererab. i dop. - M.: Lesnaya promyshlennost'. 2011. [Osipov P. E. Hydraulics, hydraulic machines and hydraulic drive: Teaching manual. 3rd ed., reprint. and add. - M.: Forest industry. 2011. [(In Russ)]]
14. Weisser G.L. Modern Submersible Pumps for cryogenic liquids // Word Pump. 2014.
15. Yelin V.M., Soldatov K.N., Sokolovskiy S.M. Nasosy i kompressory 2-ye izd., pererab. i dop. // M: Gostoptekhiz-

- dat. 2015. 98 s. [Elin V. M., Soldatov K. N., Sokolovsky S. M. Pumps and compressors 2nd ed., pererab. and add. / M: Gostoptehizdat. 2015. 98 p. [(In Russ)]
16. Hylton E.H. State of the Art Submerged cryogenic motor pump and turbine generators // Proceeding of Gastech. Conference, Houston, Texas. 2010.
17. Durnov P.I. Nasosy i kompressory. // M: Mashgiz. 2014. 938 s. [Durnov P. I. Pumps and compressors. // M: Mashgiz. 2014. 938 p. [(In Russ)]
18. Cullen D., Rush S., Madison J. Radial and axial diffusers for submerged electric motor-driven pumps // Word Pumps. 2010.
19. Rasshiritel'naya turbina, rabotayushchaya na osnove kriogennoy zhidkosti [Elektronnyy resurs]. – Rezhim dostupa: <https://findpatent.ru/patent/259/2592691.html> [Expansion turbine operating on the basis of cryogenic liquid [Electronic resource]. – Access mode: <https://findpatent.ru/patent/259/2592691.html> [(In Russ)]
20. Rush S. Effects of Unbalanced magnetic pull in cryogenic submerged electric motor pumps // Proceedings of the Vibration in fluids machinery conference. 2012.

Сведения об авторах:

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

Давыденко Мишель Игоревна, аспирант, mishelloooh@yandex.ru

Соколова Екатерина Владимировна, старший преподаватель, evlogvinenko@itmo.ru

Филатова Ольга Анатольевна, специалист 1 категории, oashestakova@itmo.ru

Information about authors:

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

Mishel I. Davydenko, PhD student, mishelloooh@yandex.ru

Ekaterina V. Sokolova, Senior Lecturer, evlogvinenko@itmo.ru

Olga A. Filatova, Specialist of the 1-st category, oashestakova@itmo.ru

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 21.03.2021.

Принята в печать 19.04.2021.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 21.03.2021.

Accepted for publication 19.04.2021.

Для цитирования: Г.К. Асланов, Т.Г. Асланов. Определение среднего значения ошибки в вычислении координат эпицентра землетрясения. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2021; 48(2): 20-28. DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-2-20-28

For citation: G.K. Aslanov, T.G. Aslanov. Average error determination in the calculation of earthquake epicenter coordinates. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2021; 48 (2): 20-28. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-2-20-28

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 550.34.01

DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-2-20-28

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СРЕДНЕГО ЗНАЧЕНИЯ ОШИБКИ В ВЫЧИСЛЕНИИ КООРДИНАТ ЭПИЦЕНТРА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

Г.К. Асланов, Т.Г. Асланов

Дагестанский государственный технический университет,
367026, г. Махачкала, пр. Имама Шамиля, 70, Россия,

Резюме. Цель. Целью исследования является определение зависимости среднего значения ошибки в вычислении координат эпицентра землетрясения от ошибок измерения скоростей сейсмических волн для различных методов локализации сейсмических событий, а также определение распределения ошибок для метода определения координат гипоцентра землетрясения с использованием овала Кассини. **Метод.** Задача решена с использованием статистических методов: частотного и регрессионного анализов, метода сравнения средних, а также перебора по сетке. **Результат.** Установлена связь между точностью измерения скоростей сейсмических волн при определении координат эпицентра землетрясения для четырех различных методов вычисления координат гипоцентра землетрясения. Предложен метод определения координат гипоцентра землетрясения с использованием фигуры четвертого порядка овала Кассини. Осуществлено сравнение плотности распределения ошибок метода овала Кассини по сравнению с другими методами. **Вывод.** Полученные результаты позволяют осуществить выбор того или иного метода вычисления координат гипоцентра исходя в зависимости от конкретной местности, в которой произошло сейсмическое событие и мест размещения сейсмических датчиков.

Ключевые слова: сейсмология, сейсмодатчик, сейсмическая волна, скорость, распределение ошибок, структура земли

AVERAGE ERROR DETERMINATION IN THE CALCULATION OF EARTHQUAKE EPICENTER COORDINATES

G.K. Aslanov, T.G. Aslanov

Daghestan State Technical University,
70 I. Shamilya Ave., Makhachkala 367026, Russia

Abstract. Objective. The study is aimed at determining the dependence of the average error in calculating the epicenter coordinates of an earthquake on errors in measuring the velocities of seismic waves for various methods of seismic event localization. Error distribution investigation for the method for determining the earthquake hypocenter coordinates using the Cassinian oval. **Methods.** The problem was solved using statistical methods: methods of frequency and regression analyzes, means comparison method, and uniform search method. **Results.** A relationship between the accuracy of measuring the velocities of seismic waves when determining the coordinates of an earthquake epicenter were established for four different earthquake hypocenter coordinates calculation methods. A method for determining the earthquake hypocenter coordinates using the fourth-order figure of the Cassinian oval was proposed. The error distribution density of the Cassinian oval method was compared with the ones of other methods. **Conclusion.** The results obtained make it possible to choose one

or another method for calculating the hypocenter coordinates depending on the specific area in which a seismic event occurred and the locations of seismic sensors.

Keywords: seismology, seismic sensor, seismic wave, velocity, error distribution, earth structure

Введение. В настоящее время определение координат очага землетрясения производится с использованием усредненных значений скоростей сейсмических волн для исследуемого региона [1-5]. Причем, эти значения применяются для больших участков земли [6], что приводит к ошибкам в определении координат гипоцентра землетрясения, что в свою очередь приводит к значительным ошибкам в оценке человеческих жертв.

Существует много методов определения координат гипоцентра землетрясения [7-12], и перед сейсмологом стоит нелегкая задача, в выборе конкретных сейсмических датчиков на местности, [13-16], так как при использовании одних и тех же сейсмодатчиков различные методы дают различные ошибки. Приведены графики, зависимости ошибки в определении координат эпицентра землетрясения от средних ошибок определения скоростей сейсмических волн.

Постановка задачи. Для моделирования задавался участок земли в виде куба, с ребром длиной 160 километров, который в свою очередь был разделен на 125 кубиков с ребрами, равными 32 км. Координаты гипоцентра землетрясения и мест расположения трех сейсмодатчиков задавались случайным образом. На каждом из участков также задавались разные значения скоростей сейсмических волн из допустимых пределов.

По этим исходным данным для четырех различных методов определения координат гипоцентра землетрясения решалась задача на выявление зависимости ошибки определения координат эпицентра землетрясения от разниц между используемыми в расчетах скоростей сейсмических волн и их фактическими значениями (ошибок скоростей сейсмических волн)

Методы исследования. Для проведения исследований была задана область объемом 4096000 кубических километра ($160 \times 160 \times 160 \text{ км}^3$), которая разбита на 125 равных участков ($5 \times 5 \times 5$), с ребрами, равными 32 км.

Скорости распространения сейсмических волн в каждом из этих участков отличаются друг от друга. Координаты гипоцентра землетрясения: $X = 80$; $Y = 80$; $Z = 30$. При этом, по принятой в настоящее время методике, для определения координат очага скорость продольной сейсмической волны при расчетах принималась равной 6 км/с, а отношение скорости продольной сейсмической волны к поперечной равно 1,7.

Сейсмодатчики могут располагаться в одних из заранее выбранных ста различных точках, определяемых формулой:

$$\begin{aligned} X_s &= \frac{R}{2MS} + \frac{R(n-1)}{MS}; \\ Y_s &= \frac{R}{2MS} + \frac{R(k-1)}{MS}, \end{aligned} \quad (1)$$

где X_s, Y_s – абсцисса и ордината сейсмодатчиков соответственно;

R – длина исследуемой области;

M – число участков, на которые разбит исследуемый участок с одинаковой скоростью;

S – число шагов внутри участка с одинаковой скоростью для размещения сейсмодатчиков и гипоцентров землетрясений;

n, k – переменные, изменяющиеся в интервале от 1 до 10.

Определим координаты точек пересечения линий, соединяющих очаг с сейсмодатчиками, с границами каждого из 125 участков, по оси абсцисс:

$$XP_i = \frac{Rk}{M}; \quad YP_i = \left(\frac{Rk}{M} - X_0 \right) \frac{Y_s - Y_0}{X_s - X_0} + Y_0; \quad ZP_i = \left(\frac{Rk}{M} - X_0 \right) \frac{Y_s}{X_s - X_0}, \quad (2)$$

по оси ординат:

$$XP_i = \left(\frac{Rk}{M} - Y_0\right) \frac{X_s - X_0}{Y_s - Y_0} + X_0; \quad YP_i = \frac{Rk}{M}; \quad ZP_i = \left(\frac{Rk}{M} - Y_0\right) \frac{X_s}{Y_s - Y_0}, \quad (3)$$

по оси Z (глубина):

$$XP_i = \left(\frac{Rk}{M} - Y_0\right) \frac{X_s - X_0}{Z_s} + X_0; \quad YP_i = \left(\frac{Rk}{M} - X_0\right) \frac{Y_s - Y_0}{Z_s} + Y_0; \quad ZP_i = \frac{Rk}{M}. \quad (4)$$

где k – номер границы пересечений;

i – переменная, изменяющаяся в интервале от 2 до $n-1$.

Зная точки пересечения сейсмической волны с ячейкой и скорость распространения сейсмической волны в каждой ячейке, можно вычислить время прохождения сейсмической волны через эту ячейку.

Суммарное время прохождения сейсмической волны от очага землетрясения до сейсмодатчика t_i может быть определено как сумма времен прохождения сейсмической волны через соответствующие ячейки.

По известному расстоянию от гипоцентра землетрясения до i -ого сейсмодатчика R_i и суммарного времени t_i может быть определена средняя скорость распространения продольной сейсмической волны от очага землетрясения до сейсмодатчика V_{pi} и скорость поперечной волны V_{si} через коэффициент пропорциональности $k = 1.7$.

Разность времен прихода продольной сейсмической волны к двум разнесенным на местности сейсмодатчикам t_r могут быть вычислены как соответствующая разность суммарных времен прохождения сейсмической волны от очага землетрясения до первого t_1 и второго сейсмодатчиков t_2 .

Разность времен прихода продольной и поперечной сейсмических волн к i -ому сейсмодатчику может быть определена с помощью уравнения [17]:

$$\Delta t_i = 0.7R_i/V_{pi}.$$

Расчеты проводились для четырех методов определения координат гипоцентра землетрясения на основе использования различных фигур второго и четвертого порядков.

1. По методу сфер координаты гипоцентра землетрясения могут быть вычислены по следующим выражениям [17-18]:

$$\begin{cases} X_0 = \frac{Y_3(R_2^2 - X_2^2 - Y_2^2) - Y_2(R_3^2 - X_3^2 - Y_3^2) + R_1^2(Y_2 - Y_3)}{2(Y_2X_3 - Y_3X_2)} \\ Y_0 = \frac{X_3(R_2^2 - Y_2^2 - X_2^2) - X_2(R_3^2 - Y_3^2 - X_3^2) + R_1^2(X_2 - X_3)}{2(X_2Y_3 - X_3Y_2)} \\ Z_0 = \sqrt{R_1^2 - X_0^2 - Y_0^2} \end{cases} \quad (5)$$

где $R_i = \frac{\Delta t_i V_p V_s}{V_p - V_s}.$

2. По методу сфер и гиперboloида координаты гипоцентра землетрясения могут быть вычислены по следующим выражениям [19]:

$$\begin{cases} X_0 = \frac{X_2^2(V_p - V_s) - t_r^2 V_p^3 + t_r^2 V_p^2 V_s - 2t_r V_p^2 V_s \Delta t_1}{2X_2(V_p - V_s)} \\ Y_0 = \frac{(X_3 - X_0)^2 + Y_3^2 + R_1^2 - X_0^2 - R_3^2}{2Y_3} \\ Z_0 = \sqrt{R_1^2 - X_0^2 - Y_0^2} \end{cases} \quad (6)$$

3. По методу сферы гиперboloида и эллипсоида координаты гипоцентра землетрясения могут быть вычислены по следующим выражениям [20]:

$$\begin{cases} X_0 = \frac{C_u(X_2^2 - t_r^2 V_p^2)}{2(t_r V_p + X_2 C_u)}; \\ Y_0 = \frac{(X_3 - X_0)^2 + Y_3^2 + R_e^2 - X_0^2 - R_3^2}{2Y_3}; \\ Z_0 = \sqrt{R_1^2 - X_0^2 - Y_0^2}, \end{cases} \quad (7)$$

где $R_e = \frac{X_2^2 - t_r^2 V_p^2}{2(t_r V_p + X_2 C_u)};$

$$C_u = \frac{k((\Delta t_1 + \Delta t_2)(X_2^2 - t_r^2 V_p^2)(1-k) - t_r k V_p^2 (\Delta t_1 + \Delta t_2)^2) + t_r X_2^2 (1-k)^2}{V_p X_2 (k^2 (\Delta t_1 + \Delta t_2)^2 - t_r^2 (1-k)^2)}.$$

4. По методу овала Кассини координаты гипоцентра землетрясения могут быть вычислены по следующим выражениям [13]:

$$\begin{cases} X = \frac{A_c^2 C_c^2 - A_c^4}{\sqrt{C_c^2 \cos^2 \alpha - A_c^2}} \cos \alpha + C_c; \\ Y = \frac{X_3^2 + Y_3^2 + R_1^2 - X^2 - R_3^2}{2Y_3}; \\ Z = \sqrt{R_1^2 - X^2 - Y^2}, \end{cases} \quad (8)$$

где $A_c = t_r V_1 / 2; C_c = X_2 / 2; D_c = \sqrt{R_1 R_2};$

$$\alpha = \arccos \left(\frac{-b - \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \right) / 2;$$

$$a = C_c^4 (2A_c^2 - C_c^2)^2 - D_c^4;$$

$$b = 2C_c^2 (D_c^4 - 2A_c^4 + C_c^2 (2A_c^2 - C_c^2))^2 (2A_c^2 - C_c^2);$$

$$c = 4A_c^4 (A_c^2 - C_c^2)^2 + (C_c^4 - D_c^4) (2A_c^2 - C_c^2)^2.$$

При этом для упрощения расчетов первый сейсмодатчик всегда находится в начале координат и во всех методах, использующих для определения координат очага землетрясения фигуру второго порядка – гиперboloид, система координат развернута таким образом, что второй сейсмодатчик лежит на оси абсцисс.

Результаты моделирования приведены на рис.1. Здесь, по оси абсцисс откладываются разности между используемыми в расчетах и истинными значениями (погрешности) скоростей сейсмических волн, определяемых выражением:

$$\Delta V = 6 - (V_{p1} + V_{p2} + V_{p3}) / 3$$

По оси ординат откладывается среднее значение ошибки в определении эпицентра землетрясения, определяемой выражением:

$$\Delta R = \sum_{i=1}^N \left| \sqrt{2} * 80 - \sqrt{X_0^2 + Y_0^2} \right| / N$$

где N число сейсмических событий с заданной погрешностью в измерении скорости.

На рис.1. кривая 1 соответствует методу сфер, кривая 2 – методу сфер и гиперboloида, кривая 3 – методу овала Кассини, кривая 4 – методу сферы гиперboloида и эллипсоида.

Моделирование проведено более чем для 100 различных значений скоростей сейсмических волн. Для овала Кассини была рассчитана плотность распределения ошибки в определении координат очага землетрясения для области с размерами 150 на 150 км, на которой менялось расположение сейсмодатчиков. За координаты гипоцентра землетрясения были приняты $X = 75$ км, $Y = 75$ км, $Z = 10$ км.

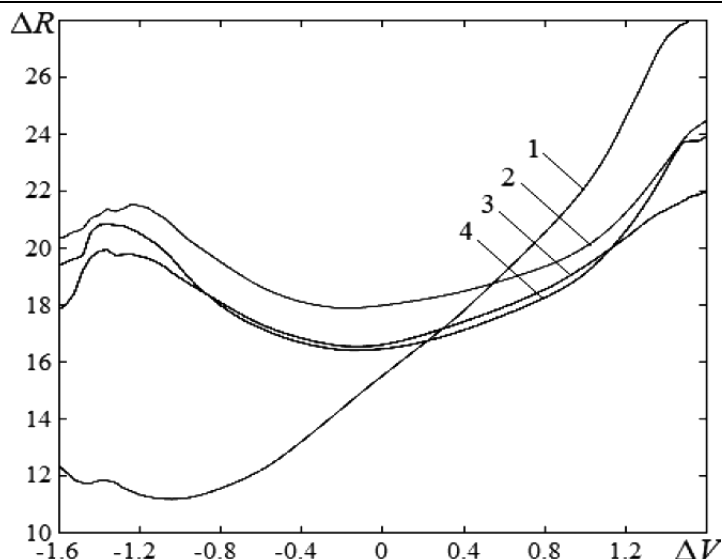


Рис. 1. Среднее значение эпицентрального рассогласования
Fig. 1. Average value of epicentral misalignment

На рис. 2 и 3 приведены нормированные плотности распределения ошибки в определении гипоцентра землетрясения. При этом координаты сейсмодатчиков менялись с шагом 18,75 км. Расчеты проводились как с учетом ошибок в измерении времен, так и без него.

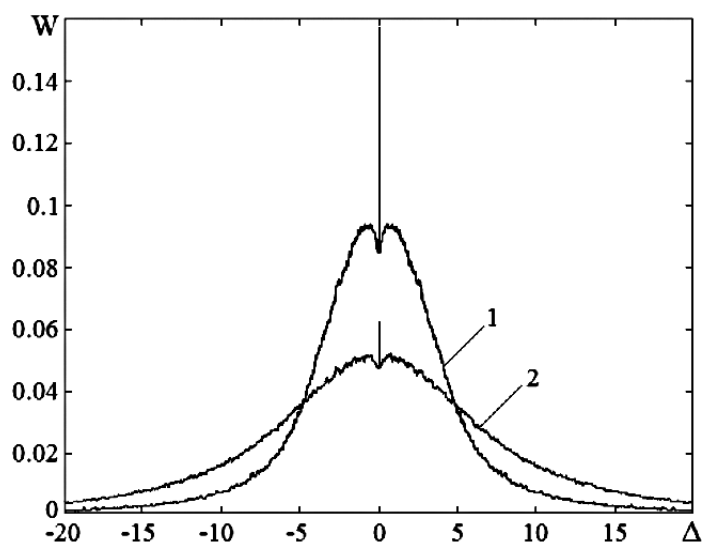


Рис. 2. Плотность распределения ошибок в определении гипоцентра землетрясения тремя методами

Fig. 2. Density of distribution of errors in determining the earthquake hypocenter by three methods

На рис. 2, кривой 1 соответствует метод сфер, кривой 2 – комбинированный метод сферы, овала Кассини и гиперboloида. В расчетах ошибки в определении разностей времен прихода сейсмических волн менялись в интервале от - 0.5 до 0.5с., с шагом 0.25 с.

На рис. 3 приведена нормированная плотность распределения ошибок в определении гипоцентра землетрясения в зависимости от интервалов ошибок в определении разности времен прихода сейсмических волн. Кривая 1 получена при изменении ошибки в определении разности времен прихода сейсмических волн в интервале от - 0.5 до 0.5 с шагом 0.25 с., кривая 2 – для интервала от - 1 до 1 с шагом 0.5 с, кривой 3 – для интервала от - 1.5 до 1.5 с шагом 0.75 с. и кривой 4 – для интервала от - 2 до 2 с шагом 1 с.

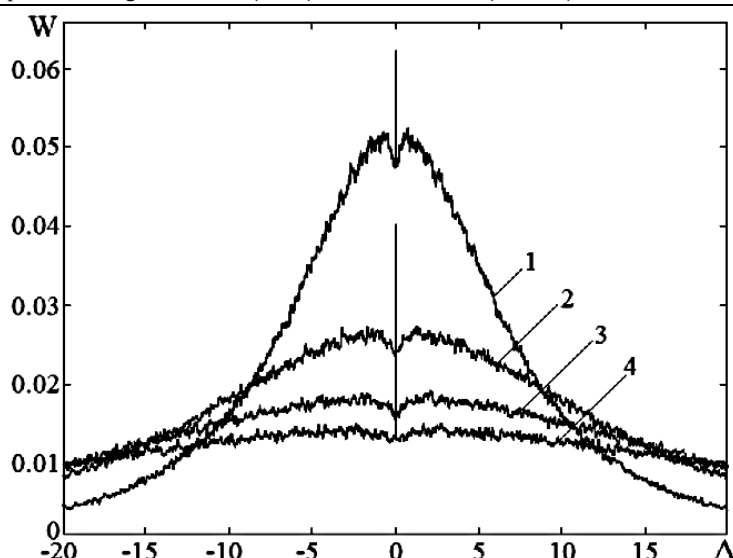


Рис. 3. Зависимость плотности распределения ошибок от интервалов ошибок в определении разности времен прихода сейсмических волн

Fig. 3. Dependence of the error distribution density on the error intervals in determining the difference in the arrival times of seismic waves

Обсуждение результатов. Как видно из рис.1, метод сфер имеет лучшие показатели при определении координат гипоцентра землетрясения при некачественном выборе скорости сейсмической волны. Это связано с тем, что при расположении сейсмодатчиков на больших удалениях от эпицентра землетрясения поверхности сфер пересекаются под острыми углами, что приводит к более точному определению координат эпицентра землетрясения, и в то же время возникают большие ошибки в определении глубины гипоцентра землетрясения.

Метод сфер и гиперboloида имеет худшие характеристики, чем метод сферы, гиперboloида и эллипсоида, это связано, как и в первом случае, с углами пересечения поверхностей второго порядка. Сфера, гиперboloид и эллипсоид всегда пересекаются под прямым углом.

Овал Кассини по сравнению с двумя предыдущими методами, показывает лучшие результаты при больших разностях, принятых в расчетах, и истинными значениями сейсмических волн, нежели при маленьких. Это связано с тем, что корень квадратный от произведения расстояний от гипоцентра землетрясения до сейсмодатчиков (характеризующий овал Кассини) является постоянной величиной.

Большие значения ошибок в измерении средних значений эпицентрального рассогласования обусловлены неудачным расположением сейсмодатчиков. Анализ зависимости плотности распределения ошибок определения координат от ошибок в значениях скоростей показывает, что овал Кассини имеет по сравнению с другими методами меньшие ошибки.

Все полученные распределения ошибок имеют вид, близкий к распределению Коши. Всплеск в районе нуля у всех распределений вызван отсутствием ошибок в определении разности времен.

Вывод. При одинаковом удалении сейсмодатчиков от гипоцентра землетрясения, желательно применять метод сфер, с использованием нижнего допустимого значения скорости сейсмической волны для конкретного региона.

При проведении исследования структуры земной коры желательно использовать методы на основе фигуры второго порядка - гиперboloида, т.к. на большом интервале ошибок в значениях скоростей, координаты очага землетрясения определяются с меньшими ошибками. При отклонениях скоростей сейсмических волн в сторону увеличения желательно применение метода овала Кассини.

Библиографический список:

1. Айвазян С.А. Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. Прикладная статистика. Основы моделирования и первичная обработка данных. М.: Финансы и статистика, 1983.
2. Ван дер Варден Б.Л. Математическая статистика. М.: ИЛ, 1960.

3. Кендалл М., Стьюарт А. Теория распределений. М.: Наука, 1966.
4. Колемаев В.А., Староверов О.В., Турундаевский В.Б. Теория вероятностей и математическая статистика. – М.: Высшая школа, 1991.
5. Бляс Э. А., Середа А.-В. И. Определение коэффициентов отражения продольных и поперечных волн по сейсмограммам продольных волн // Вестник Мурманского государственного технического университета. 2006. Т. 9. № 3. С. 389-402.
6. Етирмишли Г. Д., Казымова С. Э., Казымов И. Э. Изучение изменения скоростей продольных волн с глубиной по цифровым сейсмологическим данным // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы III Международной сейсмологической школы. Обнинск: ГС РАН, 2008. С. 54-57.
7. Асланов Т.Г., Тагиров Х.Ю., Магомедов Г.Б. Определение координат очага землетрясения с одновременным определением скоростей сейсмических волн с использованием данных четырех и более сейсмодатчиков // Свид. о гос. рег. прогр. ЭВМ № 2016662097 Рос. Федерация / заявитель и правообладатель ВГУЮ (РПА Минюста России). - № 2016619293; заявл. 02.09.16; опубл. 31.10.16.
8. Асланов Т.Г., Давудова Д.Д., Мирзаханова Л.С. Определение координат гипоцентра землетрясения при использовании комбинированного метода сфер и гиперboloида // Свид. о гос. рег. прогр. ЭВМ № 2017616673 Рос. Федерация / заявитель и правообладатель ВГУЮ (РПА Минюста России). № 2017611151; заявл. 13.02.17; опубл. 09.06.17.
9. Асланов Т.Г., Шахтарин Б.И., Сеферов А.К. Определение координат очага землетрясения методом гиперboloидов // Свид. о гос. рег. прогр. ЭВМ № 2017617744 Рос. Федерация / заявитель и правообладатель ВГУЮ (РПА Минюста России). № 2017615713; заявл. 13.06.17; опубл. 11.07.17.
10. Асланов Т.Г., Определение координат очага землетрясения методом эллипсов // Свид. о гос. рег. прогр. ЭВМ № 2017617620 Рос. Федерация / заявитель и правообладатель ВГУЮ (РПА Минюста России). № 2017615712; заявл. 13.06.17; опубл. 11.07.17.
11. Асланов Т.Г. Определение координат гипоцентра землетрясения при использовании комбинированного метода сферы, гиперboloида и эллипсоида // Свид. о гос. рег. прогр. ЭВМ № 2017660545 Рос. Федерация / заявитель и правообладатель ВГУЮ (РПА Минюста России). № 2017615709; заявл. 13.06.17; опубл. 22.09.17.
12. Асланов Т.Г., Шахтарин Б.И., Тетакаев У.Р. Определение координат гипоцентра землетрясения методом окружностей // Свид. о гос. рег. прогр. ЭВМ № 2020612122 Рос. Федерация / заявитель и правообладатель ДГТУ. № 2019665254; заявл. 26.11.2019; опубл. 18.02.2020.
13. Шахтарин Б.И., Асланов Т.Г., Тетакаев У.Р. Определение координат очага землетрясения с использованием фигур четвертого и второго порядка – овала Кассини и гиперболы. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019;46(4):134-142. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2019-46-4-134-142>
14. Асланов Т.Г. Определение координат очага землетрясения с использованием комбинированного метода. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2017;44(2):118-125. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2017-44-2-118-125>
15. Асланов Г.К., Асланов Т.Г., Курбанмагомедов К.Д., Шахтарин Б.И. Исследование зависимости ошибок в определении координат очага землетрясения от методов расчета (сфер и гиперboloидов). Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2017;44(4):87-98. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2017-44-4-87-98>
16. Асланов Т.Г., Шахтарин Б.И., Асланов Г.К. Определение координат очага землетрясения с использованием фигур второго порядка - эллипса и гиперболы // Автоматизация. Современные технологии. 2018; №11 (72) С. 503-509
17. Асланов Т.Г. Разработка алгоритма определения координат очага землетрясения, с одновременным определением скоростей сейсмических волн // Научные труды молодых исследователей программы «Шаг в будущее». Том 8. «Профессионал». Москва. 2005. С. 32-34
18. Асланов Т.Г., Асланов Г.К., Кудаев Д.А. Определение скоростей сейсмических волн по произошедшему землетрясению // XXXVI итоговая научно-техническая конференция ДГТУ: тезисы докладов. Махачкала, РИО ДГТУ, 2005. С. 72-73.
19. Асланов Т.Г., Асланов Г.К., Курбанмагомедов К.Д., Шахтарин Б.И. Зависимость ошибок в определении координат очага землетрясения от методов расчета (сфер и гиперboloидов). Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. №4 (44), 2017. С. 87-98
20. Асланов Т.Г., Мусаева У.А. Анализ плотности распределения ошибок в определении координат очага землетрясения по методам сфер и эллипсоидов. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019;46(2):61-70. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2019-46-2-61-70>

References:

1. Ayvazyan S.A. Yenyukov I.S., Meshalkin L.D. Prikladnaya statistika. Osnovy modelirovaniya i pervichnaya obrabotka dannykh. M.: Finansy i statistika, 1983. [Ayvazyan S.A. Enyukov I.S., Meshalkin L.D. Applied statistics. Basics of modeling and primary data processing. - M.: Finance and Statistics, 1983. [(In Russ)]

2. Van der Varden B.L. Matematicheskaya statistika. M.: IL, 1960. [Van der Waerden B.L. Mathematical statistics. - M.: IL, 1960. [(In Russ)]]
3. Kendall M., St'yuart A. Teoriya raspredeleniy. M.: Nauka, 1966. [Kendall M., Stewart A. Distribution theory. - M.: Nauka, 1966. [(In Russ)]]
4. Kolemeyev V.A., Staroverov O.V., Turundayevskiy V.B. Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika. – M.: Vysshaya shkola, 1991. [Kolemaev VA, Staroverov OV, Turundaevsky VB. Theory of Probability and Mathematical Statistics. M.: Higher school, 1991. [(In Russ)]]
5. Blyas E. A., Sereda A.-V. I. Opredeleniye koeffitsiyentov otrazheniya prodol'nykh i poperechnykh voln po seysmogrammam prodol'nykh voln // Vestnik Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2006. T. 9. № 3. С. 389-402. [Blas E. A., Sereda A.-V. I. Determination of P-and S-wave reflection coefficients from P-wave seismograms // Bulletin of the Murmansk State Technical University. 2006. Vol. 9. No. 3. pp. 389-402. [(In Russ)]]
6. Yetirmishli G. D., Kazymova S. E., Kazymov I. E. Izucheniye izmeneniya skorostey prodol'nykh voln s glubiny po tsifrovym seysmologicheskim dannym // Sovremennyye metody obrabotki i interpretatsii seysmologicheskikh dannykh. Materialy III Mezhdunarodnoy seysmologicheskoy shkoly. Obninsk: GS RAN, 2008. s. 54-57. [Etirmishli GD, Kazymova SE, Kazymov IE Study of changes in the velocities of longitudinal waves with depth from digital seismological data // Modern methods of processing and interpretation of seismological data. Materials of the III International Seismological School. Obninsk: GS RAS, 2008. pp. 54-57. [(In Russ)]]
7. [Aslanov T.G., Tagirov H.Yu., Magomedov G.B. Determination of coordinates of an earthquake source with simultaneous determination of seismic wave velocities using data from four or more seismic sensors // Svid. about the state. reg. prog. Computer No. 2016662097 Ros. Federation / applicant and copyright holder VSUY (RPA of the Ministry of Justice of Russia). No. 2016619293; app. 09/02/16; publ. 10/31/16. [(In Russ)]]
8. Aslanov T.G., Tagirov KH.YU., Magomedov G.B. Opredeleniye koordinat ochaga zemletryaseniya s odnoremennym opredeleniyem skorostey seysmicheskikh voln s ispol'zovaniyem dannykh chetyrekh i boleye seysmодatchikov [Aslanov T.G., Davudova D.D., Mirzakhanova L.S. Determination of the coordinates of the earthquake hypocenter using the combined method of spheres and hyperboloid // Svid. about the state. reg. prog. Computer No. 2017616673 Ros. Federation / applicant and copyright holder VSUY (RPA of the Ministry of Justice of Russia). No. 2017611151; declared 02/13/17; publ. 09.06.17. [(In Russ)]]
9. Aslanov T.G., Shakhtarin B.I., Seferov A.K. Opredeleniye koordinat ochaga zemletryaseniya metodom giperboloidov [Aslanov T.G., Shakhtarin B.I., Seferov A.K. Determination of the coordinates of the earthquake source by the method of hyperboloids // Svid. about the state. reg. prog. Computer No. 2017617744 Ros. Federation / applicant and copyright holder VSUY (RPA of the Ministry of Justice of Russia). No. 2017615713; declared 06/13/17; publ. 07/11/17. [(In Russ)]]
10. Aslanov T.G., Opredeleniye koordinat ochaga zemletryaseniya metodom ellipsov [Aslanov TG, Determination of the coordinates of the earthquake source by the method of ellipses // Svid. about the state. reg. prog. Computer No. 2017617620 Ros. Federation / applicant and copyright holder VSUY (RPA of the Ministry of Justice of Russia). No. 2017615712; declared 06/13/17; publ. 07/11/17. [(In Russ)]]
11. Aslanov T.G., Opredeleniye koordinat gipotsentra zemletryaseniya pri ispol'zovanii kombinirovannogo metoda sfery, giperboloida i ellipsoida [Aslanov TG, Determination of the coordinates of the earthquake hypocenter using the combined method of a sphere, hyperboloid and ellipsoid // Svid. about the state. reg. prog. Computer No. 2017660545 Ros. Federation / applicant and copyright holder VSUY (RPA of the Ministry of Justice of Russia). No. 2017615709; app. 06/13/17; publ. 09/22/17. [(In Russ)]]
12. Aslanov T.G., Shakhtarin B.I., Tetakayev U.R. Opredeleniye koordinat gipotsentra zemletryaseniya metodom okruzhnostey [Aslanov T.G., Shakhtarin B.I., Tetakaev U.R. Determination of the coordinates of the earthquake hypocenter by the method of circles // Svid. about the state. reg. prog. Computer No. 2020612122 Ros. Federation / applicant and copyright holder of DSTU. No. 2019665254; declared 11/26/2019; publ. 02/18/2020. [(In Russ)]]
13. Shakhtarin B.I., Aslanov T.G., Tetakayev U.R. Opredeleniye koordinat ochaga zemletryaseniya s ispol'zovaniyem figur chetvertogo i vtorogo poryadka – ovala Kassini i giperboly. Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskkiye nauki. 2019;46(4):134-142. [Shakhtarin B.I., Aslanov T.G., Tetakaev U.R. Determination of the coordinates of the earthquake source using figures of the fourth and second order - the Cassini oval and hyperbola. Herald of Daghestan State Technical University. Technical science. 2019; 46 (4): 134-142. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2019-46-4-134-142>[(In Russ)]]
14. Aslanov T.G. Opredeleniye koordinat ochaga zemletryaseniya s ispol'zovaniyem kombinirovannogo metoda. Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskkiye nauki. 2017;44(2):118-125. [Aslanov T.G. Determination of the coordinates of the earthquake source using the combined method. Herald of Daghestan State Technical University. Technical science. 2017; 44 (2): 118-125. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2017-44-2-118-125>[(In Russ)]]
15. Aslanov G.K., Aslanov T.G., Kurbanmagomedov K.D., Shakhtarin B.I. Issledovaniye zavisimosti oshibok v opredelenii koordinat ochaga zemletryaseniya ot metodov rascheta (sfer i giperboloidov). Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskkiye nauki. 2017;44(4):87-98. [Aslanov G.K., Aslanov T.G., Kurbanmagomedov K.D., Shakhtarin B.I. Investigation of the dependence of errors in determining the coor-

- dinates of an earthquake source on calculation methods (spheres and hyperboloids). Herald of Daghestan State Technical University. Technical science. 2017; 44 (4): 87-98. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2017-44-4-87-98>[(In Russ)]
16. Aslanov T.G., Shakhtarin B.I., Aslanov G.K. Opredeleniye koordinat ochaga zemletryaseniya s ispol'zovaniyem figur vtorogo poryadka - ellipsa i giperboly // Avtomatizatsiya. Sovremennyye tekhnologii. 2018; №11 (72) – S. 503-509 [Aslanov T.G., Shakhtarin B.I., Aslanov G.K. Determination of the coordinates of the earthquake source using figures of the second order - an ellipse and a hyperbola // Automation. Modern technologies. 2018; No. 11 (72) pp. 503-509[(In Russ)]
 17. Aslanov T.G. Razrabotka algoritma opredeleniya koordinat ochaga zemletryaseniya, s odnovremennym opredeleniyem skorostey seysmicheskikh voln [Aslanov T.G. Development of an algorithm for determining the coordinates of the earthquake source, with the simultaneous determination of the velocities of seismic waves // Scientific works of young researchers of the "Step into the future" program. Volume 8. "Professional". Moscow. 2005 pp. 32-34[(In Russ)]
 18. Aslanov T.G., Aslanov G.K., Kudayev D.A. Opredeleniye skorostey seysmicheskikh voln po proizoshedshemu zemletryasenyu // XXXVI itogovaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya DGTU: tezisy докладов. Makhachkala, RIO DGTU, 2005. – S. 72-73 [Aslanov T.G., Aslanov G.K., Kudaev D.A. Determination of the velocities of seismic waves from the occurred earthquake // XXXVI final scientific and technical conference of DSTU: abstracts. Makhachkala, RIO DSTU, 2005. pp. 72-73[(In Russ)]
 19. Aslanov T.G., Aslanov G.K., Kurbanmagomedov K.D., Shakhtarin B.I. Zavisimost' oshibok v opredelenii koordinat ochaga zemletryaseniya ot metodov rascheta (sfer i giperboloidov). Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki. №4 (44), 2017 S. 87-98 [Aslanov T.G., Aslanov G.K., Kurbanmagomedov K.D., Shakhtarin B.I. Dependence of errors in determining the coordinates of the earthquake source on the calculation methods (spheres and hyperboloids). Herald of Daghestan State Technical University. Technical science. No. 4 (44), 2017 - Makhachkala: DSTU, 2017. pp. 87-98 (In Russ)]
 20. Aslanov T.G., Musayeva U.A. Analiz plotnosti raspredeleniya oshibok v opredelenii koordinat ochaga zemletryaseniya po metodam sfer i ellipsoidov. Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki. 2019;46(2):61-70 [Aslanov T.G., Musayeva U.A. Analysis of the distribution density of errors in determining the coordinates of the earthquake source by the methods of spheres and ellipsoids. Herald of Daghestan State Technical University. Technical science. 2019; 46 (2): 61-70. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2019-46-2-61-70> (In Russ)]

Сведения об авторах:

Асланов Гайдарбек Кадырбекович, доктор технических наук, профессор, кафедра управления и информатики в технических системах и вычислительной техники; e-mail: uits@dstu.ru

Асланов Тагирбек Гайдарбекович, кандидат технических наук, докторант, заведующий кафедрой управления и информатики в технических системах и вычислительной техники; e-mail: tabasik@gmail.com

Information about the authors:

Gaydarbek K. Aslanov, Dr. Sci. (Technical), Prof., Department of Management and Informatics in Technical Systems and Computer Engineering; e-mail: uits@dstu.ru.

Tagirbek G. Aslanov, Cand. Sci. (Technical), Doctoral Cand., Head of Department of Management and Informatics in Technical Systems and Computer Engineering; e-mail: tabasik@gmail.com

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 20.03.2021.

Принята в печать 22.04.2021.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 20.03.2021.

Accepted for publication 22.04.2021.

Для цитирования: А.В. Бацких, В.В. Конобеевских, С.В. Ефимов. Способы оценки эффективности функционирования подсистем управления доступом на объектах информатизации органов внутренних дел и аспекты их совершенствования. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2021; 48(2): 29-39. DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-2-29-39

For citation: A.V. Batskikh, V.V. Konobeevskikh, S.V. Efimov. Methods for assessing the efficiency of access control sub-systems at informatization facilities of internal affairs bodies and aspects of their improvement. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2021; 48 (2): 29-39. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-2-29-39

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

УДК 621.3

DOI: 10.21822/2073-6185-2021-48-2-29-39

**СПОСОБЫ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ
ПОДСИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ДОСТУПОМ НА ОБЪЕКТАХ ИНФОРМАТИЗАЦИИ
ОРГАНОВ ВНУТРЕННИХ ДЕЛ И АСПЕКТЫ ИХ
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ**

А.В. Бацких, В.В. Конобеевских, С.В. Ефимов

Воронежский институт МВД России,
394065, г. Воронеж, пр. Патриотов, 53, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является анализ существующего методического обеспечения, используемого при оценивании эффективности функционирования систем защиты информации от несанкционированного доступа в автоматизированные системы, на основе исследования открытых литературных источников, международных и отраслевых стандартов РФ по информационной безопасности АС, руководящих документов и приказов Федеральной службы по техническому и экспортному контролю России, а также ведомственных приказов, инструкций и нормативных актов. **Результатом** анализа является выявление достоинств и недостатков указанного методического обеспечения, а также возможностей его использования при проведении количественной оценки эффективности функционирования подсистем управления доступом систем защиты информации от несанкционированного доступа на объектах информатизации органов внутренних дел. **Метод.** Применен метод системного анализа подходов, используемых при оценивании эффективности средств и систем обеспечения информационной безопасности. **Результат.** Представлены результаты анализа основных подходов, используемых при оценивании эффективности средств и систем обеспечения информационной безопасности автоматизированных систем. Определена связь показателя эффективности функционирования подсистем управления доступом систем защиты информации от несанкционированного доступа с основным недостатком их применения в защищенных автоматизированных системах органов внутренних дел. Обоснованы основные направления совершенствования существующего методического обеспечения, предложены способы и показатели для проведения количественной оценки эффективности функционирования подсистем управления доступом (в том числе модифицированных на основе использования новых информационно-коммуникационных технологий). **Вывод.** Полученные результаты могут быть использованы для проведения количественной оценки защищенности существующих и разрабатываемых автоматизированных систем на объектах информатизации органов внутренних дел.

Ключевые слова: автоматизированная система, система защиты информации, подсистема управления доступом, несанкционированный доступ, показатель эффективности, количественная оценка эффективности

**METHODS FOR ASSESSING THE EFFICIENCY OF ACCESS CONTROL
SUBSYSTEMS AT INFORMATIZATION FACILITIES OF INTERNAL
AFFAIRS BODIES AND ASPECTS OF THEIR IMPROVEMENT**

A.V. Batskikh, V.V. Konobeevskikh, S.V. Efimov

*Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russian Federation,
53 Patriotov Ave., Voronezh 394065, Russia*

Abstract. Objective. The purpose of the article is to analyse the existing methodology used to assess the efficiency of automated information security systems by studying open literature sources, international and industry standards of the Russian Federation on information security of automated systems, guidelines and orders of the Federal Service for Technical and Expert Control of Russia, as well as departmental orders, instructions and regulations on information security at informatization facilities of internal affairs bodies. The analysis results in identifying the advantages and disadvantages of the specified methodology, as well as the possibilities of its use when conducting a quantitative assessment of the efficiency of access control subsystems of information security systems at the informatization facilities of internal affairs bodies. **Methods.** To achieve this goal, the method for system analysis of approaches used to assess the efficiency of information security tools and systems has been applied. **Results.** The paper presents results of analysing the main approaches used to assess the efficiency of tools and systems for information security of automated systems. The paper determines the relationship between the efficiency indicator of access control subsystems of information security systems and the main disadvantage of their use in protected automated systems of internal affairs bodies. The paper substantiates main directions of improving the existing methodology, proposes methods and indicators for quantifying the efficiency of access control subsystems (including those modified on the basis of using new information and communication technologies) of information security systems in protected automated systems of internal affairs bodies. **Conclusion.** The results obtained can be used to quantify the security level of existing automated systems and those being developed at informatization facilities of internal affairs bodies.

Keywords: automated system, information security system, access control subsystem, unauthorized access, efficiency indicator, efficiency quantification

Введение. Проблема оценивания эффективности функционирования подсистем управления доступом систем защиты информации (СЗИ) от несанкционированного доступа (НСД) в защищенные автоматизированные системы (АС) органов внутренних дел (ОВД) является одним из ключевых вопросов формирования требований по идентификации и аутентификации штатных пользователей как составной части общих требований по защите информации (ЗИ) в АС, эксплуатируемых на объектах информатизации ОВД [1-3]. Оценивание эффективности функционирования подсистемы управления доступом СЗИ от НСД в АС ОВД необходимо проводить: при разработке СЗИ от НСД; при ее входном и периодическом контроле; при приемке; при сертификации, а также при аттестации объекта информатизации, эксплуатирующего защищенную АС ОВД в целом [4-5].

В приказе МВД России от 14.03.2012 № 169 «Об утверждении Концепции обеспечения информационной безопасности органов внутренних дел Российской Федерации до 2020 года» определены цели, задачи, принципы и основные направления обеспечения информационной безопасности (ИБ) ОВД. Одним из механизмов реализации Концепции является разработка критериев и методов оценки эффективности систем обеспечения ИБ ОВД, однако конкретная методика оценки эффективности функционирования СЗИ от НСД в АС, а тем более их подсистем, в приказе не рассматривается [3]. В то же время, данный документ во многом подтверждает актуальность проблемы оценивания эффективности как СЗИ от НСД в целом, так и их отдельных подсистем и определяет перспективные аспекты научных исследований в данной области применительно к объектам информатизации, эксплуатирующим защищенные АС ОВД.

В связи с недостаточностью научных исследований, посвященных разработке методов и процедур оценки эффективности функционирования отдельных подсистем СЗИ от НСД в АС ОВД, проанализируем способы и показатели, используемые в настоящее время при оценивании эффективности функционирования СЗИ от НСД в АС с целью выявления их достоинств и недостатков, а также возможностей применения при проведении количественной оценки эффективности функционирования подсистем управления доступом СЗИ от НСД на объектах информатизации ОВД.

Постановка задачи. Для реализации поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Проанализировать открытые литературные источники, международные и отраслевые стандарты Российской Федерации по ИБ АС, руководящие документы и приказы ФСТЭК России, а также ведомственные приказы, инструкции и нормативные акты по вопросам ЗИ от НСД на объектах информатизации ОВД.

2. Определить основные аспекты совершенствования существующего методического обеспечения, используемого при оценивании эффективности функционирования СЗИ от НСД в АС, с целью проведения количественной оценки эффективности функционирования подсистем управления доступом (в том числе модифицированных на основе использования новых информационно-коммуникационных технологий) СЗИ от НСД в защищенных АС на объектах информатизации ОВД.

Методы исследования. Методологической основой исследования является системный анализ подходов, используемых при оценивании эффективности средств и систем обеспечения ИБ. Согласно [6] эффективность программных средств (ПСр) трактуется как совокупность свойств ПСр, характеризующая аспекты его уровня пригодности, связанные с характером и временем использования ресурсов (других ПСр, технических средств, материалов, услуг различных категорий персонала), необходимых при заданных условиях функционирования. Приведенные в [6] термины и определения справедливы не только для ПСр, но и для программных систем, их объединяющих, к которым в полной мере можно отнести и СЗИ от НСД в АС ОВД.

В стандартах [6-8] представлены иерархические модели качества ПСр, приведены термины и определения характеристик и рассмотрены примеры подхарактеристик их качества, позволяющие оценивать качество и эффективность ПСр (включая и ПСр ЗИ), задавая иерархию характеристик и подхарактеристик качества. В данном случае эффективность ПСр рассматривается как одна из характеристик их качества.

С учетом выше изложенного и в соответствии с [9-11] эффективность функционирования СЗИ от НСД при эксплуатации АС ОВД в защищенном исполнении можно определить, как степень соответствия результатов защиты конфиденциальной информации поставленной цели защиты или степень решения поставленной совокупности задач ЗИ.

Таким образом, эффективность функционирования СЗИ от НСД может оцениваться как относительно заранее определенных и декларированных для конкретной АС ОВД задач защиты, которые должны выполняться ее СЗИ, так и относительно всех задач защиты, сформулированных для данной АС ОВД. Для частичного парирования такой условности на практике используются три основных подхода при оценивании эффективности, основанные на унификации целей и задач ЗИ (табл. 1), однако ни один из них не позволяет парировать указанную условность в полной мере, что обусловлено относительностью, присущей самому понятию «эффективность» [9, 8, 12-14].

Таблица 1. Основные подходы, используемые при оценивании эффективности средств и систем обеспечения информационной безопасности автоматизированных систем
Table 1. The main approaches used in assessing the effectiveness of tools and systems for ensuring information security of automated systems

№	Характеристика подхода Characteristics of the approach	Способ реализации подхода How to implement the approach
1	Основан на определении соответствия средств и систем обеспечения информационной безопасности сформированным требованиям. Based on determining the compliance of information security tools and systems with the formed requirements	Требования по ЗИ задаются в виде перечня механизмов ЗИ, которые необходимо иметь в АС для ее соответствия определенному уровню (классу) защищенности [15, 16] Requirements for RFI are set in the form of a list of RFI mechanisms that must be in the AS for its compliance with a certain level (class) of security [15, 16] Требования по ЗИ задаются в виде перечня функций, которые необходимо выполнить для достижения определенного уровня (класса) защищенности информации в АС [1, 17] Requirements for IS are set in the form of a list of functions that must be performed to achieve a certain level (class) of information security in the AU [1, 17]
2	Основан на экспертных суждениях о достижении средствами и системами обеспечения ИБ цели ЗИ. Based on expert judgments about the achievement of IS goals by means and systems of information security.	Результаты экспертного опроса специалистов обрабатываются и представляются в виде балльной оценки, которая интерпретируется в виде суждений об эффективности принятых мер защиты [9, 10, 18] The results of the expert survey of specialists are processed and presented in the form of a score, which is interpreted in the form of judgments about the effectiveness of the protection measures taken [9, 10, 18]
3	Основан на математическом моделировании процессов функционирования средств и систем обеспечения ИБ. Based on mathematical modeling of the functioning of information security tools and systems.	Для оценивания эффективности средств и систем обеспечения ИБ в АС используются соответствующие критерии и показатели, определяемые с помощью применяемых для этих целей математических методов и моделей [4, 11, 19, 20] To assess the effectiveness of the means and systems for ensuring IS in the nuclear power plant, the corresponding criteria and indicators are used, which are determined using the mathematical methods and models used for these purposes [4, 11, 19, 20]

Первый подход (оценочный), используемый при оценивании эффективности средств и систем обеспечения ИБ, получивший широкое распространение для оценивания эффективности функционирования СЗИ от НСД в АС (в том числе и в АС ОВД), заключается в формировании требований по защите, выполнение которых будет свидетельствовать о достаточности принятых мер [1, 15-17]. При этом целью защиты станет достижение условий, обеспечивающих выполнение указанных требований. В данном случае эффективность защиты является мерой приближения к заданным условиям.

Указанный подход реализуется в двух вариантах, но наибольшую популярность получил так называемый «функциональный» вариант, при котором требования по ЗИ в АС задаются в виде перечня функций, выполнение которых необходимо для достижения определенного уровня защищенности информации [1, 17]. Уровень защищенности (в качестве таких уровней могут рассматриваться классы защищенности АС) чаще всего устанавливается декларативно экспертным путем. ЗИ считается эффективной, если выполняются все функции, соответствующие заданному уровню защищенности информации (так называемые «функции безопасности» (ФБ)) [9, 10].

Основным недостатком «функционального» варианта является проведение, по сути, «бинарной оценки», при которой не оценивается эффективность конкретных ФБ, а констатируется лишь факт ее наличия или отсутствия при реализации данных функций сертифицированными ПСр [20]. При этом происходит подмена понятия эффективности понятием достаточно-

сти принятых мер защиты, что не является мерой приближения к поставленной цели защиты [9].

Сущность второго подхода (экспертного), используемого при оценивании эффективности средств и систем обеспечения ИБ, заключается в том, что факту достижения цели защиты ставится в соответствие ряд экспертных суждений с использованием некоторой качественной шкалы, которая затем переводится в балльную шкалу [9, 10, 18]. Набранные баллы суммируются (или перемножаются).

Решение о достаточности принятых мер защиты принимается при превышении полученной суммой (произведением) баллов определенного порога. Каждому значению суммы (произведения) ставится в соответствие определенное суждение об эффективности защиты. В этом случае сумма (или произведение) баллов рассматривается как мера эффективности [9, 10].

Данный подход реализуется применением балльного метода оценки эффективности ЗИ, основанного на опросе экспертов-специалистов, обработке полученных результатов и выдаче в виде баллов с последующей интерпретацией полученной балльной оценки в виде суждений об эффективности принятых мер защиты.

Указанный метод реализован в целом ряде международных стандартов и программных продуктов, таких как ISO/IEC 27002:2005-2013 [18] и его инструментарии — программном продукте COBRA, программном продукте Risk Watch, программном продукте, реализующем широко используемый в настоящее время метод CRAMM, и др. [9].

Очевидным недостатком изложенных подходов применительно к оцениванию эффективности функционирования подсистем управления доступом СЗИ от НСД в АС ОВД является их недостаточная точность, обусловленная экспертным участием в процессе оценивания.

Указанных выше недостатков лишен третий подход (вероятностный), используемый при оценивании эффективности, основанный на математическом моделировании (аналитическом, имитационном) процессов функционирования средств и систем обеспечения ИБ в АС. В рассматриваемых методах оценки применяются различные критерии и показатели эффективности, методики их расчета и критерии оптимальности [4, 5, 9-11, 19, 20].

Данный подход используется для описания случайных событий, в частности, на основе определения их вероятностно-временных характеристик (ВВХ), что дает возможность проводить количественную оценку эффективности средств и систем обеспечения ИБ в АС и исследовать их в динамическом (временном) режиме функционирования [11, 18, 20-23].

Поскольку функционирование СЗИ от НСД в АС представляет собой сложный динамический процесс для его описания в настоящее время широко применяются модели, построенные на сетях Петри-Маркова (основанные на теории сетей Петри и марковских (полумарковских) процессах), что позволяет определять ВВХ функционирования СЗИ от НСД [9-11, 24-27].

Вероятностный подход, как и предыдущие два подхода, используется при оценивании эффективности функционирования СЗИ от НСД в целом как сложной программной системы. В то же время некоторые из предложенных методик [11, 17] могут быть применены и при оценивании эффективности функционирования отдельных подсистем СЗИ от НСД (включая подсистему управления доступом) в защищенных АС, эксплуатируемых на объектах информатизации ОВД, при условии совершенствования существующего математического обеспечения оценки эффективности путем введения ВВХ отдельных состояний функционирования СЗИ от НСД с использованием обратного преобразования Лапласа.

Обсуждение результатов. Задачи анализа, обоснования и разработки показателей эффективности функционирования СЗИ от несанкционированного доступа применительно к проектированию и управлению процессами ЗИ в АС не являются новыми и решены в ряде науч-

ных работ [12, 14, 19-22]. Под показателем эффективности функционирования понимается мера степени соответствия реального и требуемого результатов функционирования СЗИ от НСД [11].

В [11] проведен достаточно подробный анализ вариантов выбора атрибутов (показателей) эффективности функционирования СЗИ от несанкционированного доступа в АС, смысловые значения которых принципиально схожи.

Исследуя процесс функционирования СЗИ от несанкционированного доступа в АС на трех уровнях (концептуальном, операционном, детальном), автором предложена система частных показателей эффективности функционирования данной сложной (иерархической) программной системы, учитывающих реально существующие недостатки эксплуатации защищенных АС на объектах информатизации ОВД, и обосновано введение агрегирующего их интегрального показателя эффективности.

Опыт эксплуатации современных АС на объектах информатизации ОВД показал, что из указанных в [11] недостатков их эксплуатации максимальное влияние на эффективность функционирования подсистем управления доступом СЗИ от несанкционированного доступа оказывает непосредственная зависимость ресурсоемкости СЗИ от несанкционированного доступа от вычислительного ресурса АС (процессорного времени, оперативной памяти, дискового пространства).

Использование новых информационно-телекоммуникационных технологий с целью повышения реальной защищенности современных АС в процессе их эксплуатации на объектах информатизации ОВД не должно усугублять указанный недостаток.

В качестве одной из таких технологий применительно к подсистеме управления доступом СЗИ от несанкционированного доступа в АС ОВД предлагается дополнительная биометрическая аутентификация, основанная на распознавании субъекта доступа по индивидуальной динамике клавиатурного набора (клавиатурному почерку).

Управление функциональностью доработанной (модифицированной) подсистемы управления доступом СЗИ от несанкционированного доступа в АС ОВД за счет усложнения процедуры аутентификации штатных пользователей (в первую очередь, при обращении к особо важному информационному ресурсу) и сокращения необходимого для ее реализации временного диапазона обеспечит достижение требуемого уровня защищенности конфиденциальной информации без нарушения эффективности функционирования АС ОВД по прямому назначению.

В соответствии с выше изложенным в качестве показателя эффективности функционирования подсистемы управления доступом СЗИ от несанкционированного доступа в защищенных АС, эксплуатируемых на объектах информатизации ОВД, целесообразно использовать напрямую зависимый от времени динамический показатель временной эффективности $V_{ВЭ}$ пуд, под которым согласно [7] понимается способность программы выполнять заданные действия в интервал времени, отвечающий заданным требованиям.

Взаимосвязь данного показателя и выявленного недостатка функционирования АС в защищенном исполнении на объектах информатизации ОВД представлена в табл. 2.

Таким образом, $V_{ВЭ}$ пуд отражает спектр свойств подсистемы управления доступом (в том числе модифицированного варианта) с учетом динамики ее функционирования. Задачу оценивания $V_{ВЭ}$ пуд в математическом виде можно представить как нахождение отображения $F: V_{ВЭ} \text{ пуд} \rightarrow \{0,1\}$, где F определяет правила, реализуемые соответствующими моделями и алгоритмами.

Таблица 2. Связь показателя эффективности функционирования подсистем управления доступом СЗИ от НСД с основным недостатком его применения в защищенных АС ОВД

Table 2. Relationship between the efficiency indicator of the functioning of the access control subsystems of the information security system from the unauthorized access system with the main disadvantage of their use in protected ATS AS

Показатель Indicator	$V_{вэ\text{ пуд}}$ — временная эффективность функционирования подсистемы управления доступом СЗИ от НСД $V_{вэ\text{ пуд}}$ — temporal efficiency of the functioning of the access control subsystem of the information security system from the unauthorized access system.
Смысловое значение показателя Semantic value of the indicator	Способность подсистемы управления доступом соответствовать заявленным требованиям (с точки зрения временных параметров ее функционирования), а также находить разумный компромисс (эффективное решение), связанный с совместным функционированием СЗИ от несанкционированного доступа и АС ОВД по ее прямому функциональному назначению (обработка, хранение и передача конфиденциальной информации). The ability of the access control subsystem to meet the stated requirements (in terms of the time parameters of its functioning), as well as find a reasonable compromise (effective solution) associated with the joint operation of the information security system from the NSD and the ATS AS according to its direct functional purpose (processing, storage and transmission of confidential information).
Недостаток Flaw	Непосредственная зависимость ресурсоемкости СЗИ от НСД от вычислительного ресурса АС. Direct dependence of the resource intensity of the information security system on the NSD on the computing resource of the AS
Смысловое значение недостатка The semantic meaning of lack	Выполнение СЗИ от НСД защитных функций осуществляется в процессе функционирования АС ОВД в защищенном исполнении, что приводит к снижению производительности системы за счет использования процедур защиты части вычислительного ресурса АС в ущерб реализации ее целевых функций. Ограниченность вычислительного ресурса АС ОВД влечет за собой увеличение времени реализации СЗИ от НСД защитных функций и, как следствие, наблюдается несоответствие используемой СЗИ предъявляемым к ней требованиям по ЗИ. The implementation of the security information system from the unauthorized system of protective functions is carried out in the process of functioning of the ATS AS in a protected version, which leads to a decrease in the performance of the system due to the use of the procedure for protecting a part of the computing resource of the AS to the detriment of the implementation of its target functions. The limited computing resource of the ATC AS entails an increase in the time for the implementation of the ISS from the NSD of protective functions and, as a consequence, there is a discrepancy between the ISS used and the IS requirements for it.

Вывод. Таким образом, анализ научно-технической литературы по проблеме оценивания эффективности функционирования средств и систем обеспечения ИБ [4, 5, 9-11, 19, 20], международных и отраслевых стандартов РФ по ИБ АС [1, 6-8, 17, 18], руководящих документов и приказов Федеральной службы по техническому и экспортному контролю (ФСТЭК) России [2, 15, 16], а также ведомственных нормативных актов по вопросам ЗИ на объектах информатизации ОВД [3] выявил ряд вопросов, требующих безотлагательного решения применительно к подсистеме управления доступом СЗИ от НСД с целью повышения реальной защищенности АС на объектах информатизации ОВД:

– практически отсутствуют показатели эффективности и методики количественной оценки эффективности функционирования подсистем управления доступом СЗИ от НСД в защищенных АС ОВД;

– существующие показатели эффективности и методики количественной оценки эффективности ПСр и систем обеспечения ИБ, как правило, не отражают реальные недостатки эксплуатации защищенных АС на объектах информатизации ОВД, а, следовательно, не применимы при оценивании эффективности их функционирования;

– показатели эффективности и методики, разработанные для оценки эффективности функционирования СЗИ от НСД с учетом реально существующих недостатков эксплуатации защищенных АС ОВД, позволяют количественно оценивать эффективность функционирования СЗИ от НСД в целом как сложной программной системы, но не могут быть применены при оценивании эффективности функционирования отдельных ее подсистем (включая подсистему управления доступом);

– для повышения реальной защищенности современных АС в процессе их эксплуатации на объектах информатизации ОВД целесообразно доработать существующие подсистемы управления доступом СЗИ от НСД на основе использования новых информационно-телекоммуникационных технологий;

– для проведения количественной оценки эффективности функционирования подсистем управления доступом СЗИ от НСД в защищенных АС, эксплуатируемых на объектах информатизации ОВД, требуются: разработка динамического показателя временной эффективности, отражающего реальные динамические свойства подсистемы управления доступом (в том числе ее модифицированного варианта); совершенствование существующего математического обеспечения оценки эффективности путем введения вероятностно-временных характеристик отдельных состояний функционирования СЗИ от НСД с использованием обратного преобразования Лапласа.

Библиографический список:

1. ГОСТ Р ИСО/МЭК 15408-2-2013. Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Критерии оценки безопасности информационных технологий. Часть 2: Функциональные компоненты безопасности [Электронный ресурс]. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293774/4293774728.pdf> (дата обращения: 28.02.2020).
2. ФСТЭК России. Руководящий документ. Концепция защиты средств вычислительной техники и автоматизированных систем от несанкционированного доступа к информации [Электронный ресурс]. URL: <http://fstec.ru/component/attachments/download/299> (дата обращения: 28.02.2020).
3. Об утверждении Концепции обеспечения информационной безопасности органов внутренних дел Российской Федерации до 2020 года: приказ МВД России от 14.03.2012 № 169 [Электронный ресурс]. URL: <http://policemagazine.ru/forum/showthread.php?t=3663> (дата обращения: 02.03.2020).
4. Методики оценки надежности систем защиты информации от несанкционированного доступа автоматизированных систем / Бокова О.И. [и др.] // Труды СПИИ РАН. Т. 18 № 6 (2019). С.-Пб.: СПИИРАН, 2019. 2019. Т. 18. № 6. С. 1300-1331. SSN 2078-918. DOI 10.15622/sp.2019.18.6.
5. Дровникова И.Г. Численные методы расчета показателя эффективности вспомогательной подсистемы в системе электронного документооборота / И.Г. Дровникова, П.В. Зиновьев, Е.А. Рогозин // Вестник Воронеж. ин-та МВД России. 2016. № 4. С. 114-121.
6. ГОСТ 28806-89. Качество программных средств. Термины и определения [Электронный ресурс]. URL: http://www.kimmeria.nw.ru/standart/glosys/gost_28806_90.pdf (дата обращения: 03.03.2020).
7. ГОСТ 28195-89. Оценка качества программных средств. Общие положения [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200009135> (дата обращения: 05.03.2020).
8. ГОСТ Р ИСО/МЭК 9126-93. Информационная технология. Оценка программной продукции. Характеристики качества и руководства по их применению [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/gost-r-iso-mek-9126-93> (дата обращения 05.03.2020).
9. Радько Н.М. Проникновения в операционную среду компьютера: модели злоумышленного удаленного доступа: учеб. пособие / Н.М. Радько, Ю.К. Язов, Н.Н. Корнеева. Воронеж: ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», 2013. 265 с.
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. Попов А.Д. Модели и алгоритмы оценки эффективности систем защиты информации от несанкционированного доступа с учетом их временных характеристик в автоматизированных системах органов внутренних дел: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.19 / Попов Антон Дмитриевич. Воронеж, 2018. 163 с.
12. Xin Z. Research on effectiveness evaluation of the mission-critical system / Z. Xin, M. Shaojie, Z. Fang // Proceedings of 2013 2nd International Conference on Measurement, Information and Control. 2013. pp. 869-873.

13. Maximizing Uptime of Critical Systems in Commercial and Industrial Applications VAVR-8K4TVA_R1_EN.pdf [Электронный ресурс]. URL:https://download.schneider-eletric.com/files?p_Doc_Ref=SPD_VAVR-8K4TVA_EN (дата обращения: 06.03.2020).

14. Effectiveness Evaluation on Cyberspace Security Defense System / L. Yun [et ol.] // International Conference on Network and Information Systems for Computers (IEEE Conference Publications). 2015. pp. 576-579.

15. ФСТЭК России. Руководящий документ. Средства вычислительной техники. Защита от несанкционированного доступа к информации. Показатели защищенности от несанкционированного доступа к информации [Электронный ресурс]. URL:<http://fstec.ru/tekhnicheskaya-zashchita-informatsii/dokumenty/114-spetsialnye-normativnye-dokumenty/383-rukovodyashchij-dokument-reshenie-predsedatelya-gostekhkommisii-rossii-ot-25-iyulya-1997-g> (дата обращения: 06.03.2020).

16. ФСТЭК России. Руководящий документ. Автоматизированные системы. Защита от несанкционированного доступа к информации. Классификация автоматизированных систем и требования по защите информации [Электронный ресурс]. URL:<https://fstec.ru/tekhnicheskaya-zashchita-informatsii/dokumenty/114-spetsialnye-normativnye-dokumenty/384-rukovodyashchij-dokument-reshenie-predsedatelya-gostekhkommisii-rossii-ot-30-marta-1992-g> (дата обращения: 10.03.2020).

17. ISO/IEC 17000:2004. Conformity assessment. Dictionary and General principles [Электронный ресурс]. — URL:https://pqm-online.com/assets/files/lib/std/iso_17000-2004.pdf (дата обращения: 10.03.2020).

18. ISO/IEC 27002:2005-2013. Information technology. Security method. Practical rules of information security management [Электронный ресурс]. URL:<http://docs.cntd.ru/document/gost-r-iso-mek-17799-2005> (дата обращения 10.03.2020).

19. Разработка моделей и алгоритмов оценки эффективности подсистемы защиты конфиденциальных сведений при ее проектировании в системах электронного документооборота ОВД: монография [Электронный ресурс] / Дровникова И.Г. [и др.]. Воронеж: Воронеж. ин-т МВД России, 2019. 116 с.

20. Застрожнов И.И. Моделирование и исследование динамики функционирования программных систем защиты информации для оценки и анализа качества их функционирования при проектировании и управлении: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.18 / Застрожнов Игорь Иванович. Воронеж, 2005. 181 с.

21. Korniyenko B.Y. Design and research of mathematical model for information security system in computer network / B.Y. Korniyenko, L.P. Galata // Science-Based Technologies. 2017. Vol. 34. Issue 2. pp. 114–118.

22. Nazareth D. System dynamics model for information security management / D. Nazareth, J. Choi // Information & Management. 2015. Vol. 52. Issue 1. pp. 123–134.

23. Kresimir S. The information systems' security level assessment model based on an ontology and evidential reasoning approach / S. Kresimir, O Effectiveness Evaluation on Cyberspace Security Defense System. Hrvoje, G. Marin // Computers & Security. 2015. pp. 100-112.

24. White S.C. Comparison of Security Models: Attack Graphs Versus Petri Nets / S.C. White, S.S. Sarvestani // Advances in Computers. 2014. Vol. 94. pp. 1–24.

25. Nikishin K. Implementation of time-triggered ethernet using colored Petri NET / K. Nikishin, N. Konnov, D. Pashchenko // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). 2017. pp. 1–5.

26. Charaf H. A colored Petri-net model for control execution of distributed systems / H. Charaf, S. Azzouzi // 4th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT). 2017. pp. 277-282.

27. Network security analyzing and modeling based on Petri net and Attack tree for SDN / Y. Linyuan [and others] // 2016 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC). 2016. pp. 133-187.

References:

1. GOST R ISO/MEK 15408-2-2013. Informatsionnaya tekhnologiya. Metody i sredstva obespecheniya bezopasnosti. Kriterii otsenki bezopasnosti informatsionnykh tekhnologiy. Chast' 2: Funktsional'nyye komponenty bezopasnosti [GOST R ISO / IEC 15408-2-2013. Information technology. Methods and means of ensuring safety. Criteria for assessing the security of information technology. Part 2: Functional components of security [Electronic resource]. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293774/4293774728.pdf> (date accessed: 02/28/2020). (In Russ)]
2. FSTEK 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]. URL: <http://fstec.ru/component/attachments/download/299> (date accessed: February 28, 2020). (In Russ)]
3. 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]. URL: <http://policemagazine.ru/forum/showthread.php?t=3663> (date accessed: 03/02/2020). (In Russ)]
4. Metodiki otsenki nadezhnosti sistem zashchity informatsii ot nesanktsionirovannogo dostupa avtomatizirovannykh sistem / Bokova O.I. [i dr.] [Methods for assessing the reliability of information protection systems against unauthorized access of automated systems / Bokova OI. [and others] // Proceedings of the SPII RAS. Vol.

- 18 No. 6 (2019). S.-Pb. : SPIIRAS, 2019.2019.T. 18.No. 6.pp. 1300-1331. SSN 2078-918. DOI 10.15622 / sp.2019.18.6. (In Russ)]
5. Drovnikova I.G. Chislennyye metody rascheta pokazatelya effektivnosti vspomogatel'noy podsystemy v sisteme elektronnoy dokumentooborota [Drovnikova I.G. Numerical methods for calculating the efficiency indicator of the auxiliary subsystem in the electronic document management system / I.G. Drovnikova, P.V. Zinoviev, E.A. Rogozin // Bulletin Voronezh. Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia. 2016. No. 4. S. 114-121. (In Russ)]
6. GOST 28806-89. Kachestvo programmnykh sredstv. Terminy i opredeleniya [Elektronnyy resurs]. [GOST 28806-89. The quality of the software. Terms and definitions [Electronic resource]. URL: http://www.kimmeria.nw.ru/standart/glosys/gost_28806_90.pdf (date accessed: 03.03.2020). (In Russ)]
7. GOST 28195-89. Assessment of the quality of software. General provisions [Elektronnyy resurs]. URL: [GOST 28195-89. Otsenka kachestva programmnykh sredstv. Obshchiye polozheniya [Elektronnyy resurs]. URL:<http://docs.cntd.ru/document/1200009135> (data obrashcheniya: 05.03.2020). <http://docs.cntd.ru/document/1200009135> (date accessed: 03/05/2020). (In Russ)]
8. GOST R ISO/MEK 9126-93. Informatsionnaya tekhnologiya. Otsenka programnoy produktsii. Kharakteristiki kachestva i rukovodstva po ikh primeneniyu [GOST R ISO / IEC 9126-93. Information technology. Evaluation of software products. Quality characteristics and guidelines for their application [Electronic resource]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/gost-r-iso-mek-9126-93> (date of treatment 03/05/2020). (In Russ)]
9. Rad'ko N.M. Proniknoveniya v operatsionnuyu sredu komp'yutera: modeli zloumyshlennogo udalennogo dostupa: ucheb. posobiye / N.M. Rad'ko, YU.K. YAzov, N.N. Korneyeva. Voronezh: FGBOU VPO «Voronezhskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet», 2013. 265 s. [Radko N.M. Penetration into the operating environment of a computer: models of malicious remote access: textbook. allowance / N.M. Radko, Yu.K. Yazov, N.N. Korneeva. Voronezh: Voronezh State Technical University, 2013.265 p. (In Russ)]
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. Popov A.D. Modeli i algoritmy otsenki effektivnosti sistem zashchity informatsii ot nesanktsionirovannogo dostupa s uchetom ikh vremennykh kharakteristik v avtomatizirovannykh sistemakh organov vnutrennikh del: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.13.19 / Popov Anton Dmitriyevich. Voronezh, 2018. 163 s. [Popov A.D. Models and algorithms for evaluating the effectiveness of information protection systems against unauthorized access, taking into account their time characteristics in automated systems of internal affairs bodies: dis. Cand. tech. Sciences: 05.13.19 / Popov Anton Dmitriyevich. Voronezh, 2018.163 p. (In Russ)]
12. Xin Z. Research on effectiveness evaluation of the mission-critical system/Z. Xin, M. Shaojie, Z. Fang// Proceedings of 2013 2nd International Conference on Measurement, Information and Control. 2013. 869-873.
13. Maximizing Uptime of Critical Systems in Commercial and Industrial Applications VAVR-8K4TVA_R1_EN.pdf [Electronic resource]. URL: https://download.schneider-electric.com/files?p_Doc_Ref=SPD_VAVR-8K4TVA_EN (date accessed: 03/06/2020).
14. Effectiveness Evaluation on Cyberspace Security Defense System / L. Yun [et al.] // International Conference on Network and Information Systems for Computers (IEEE Conference Publications). 2015. pp.576-579.
15. FSTEK Rossii. Rukovodyashchiy dokument. Sredstva vychislitel'noy tekhniki. Zashchita ot nesanktsionirovannogo dostupa k informatsii. Pokazateli zashchishchennosti ot nesanktsionirovannogo dostupa k informatsii [Elektronnyy resurs]. [FSTEC of Russia. Guidance document. Computer facilities. Protection against unauthorized access to information. Indicators of security against unauthorized access to information [Electronic resource]. URL: <http://fstec.ru/tekhnicheskaya-zashchita-informatsii/dokumenty/114-spetsialnye-normativnye-dokumenty/383-rukovodyashchij-dokument-reshenie-predsdatelya-gostekhkommisii-rossii-otlyat-25-iyu> date of access: 03/06/2020). (In Russ)]
16. FSTEK Rossii. Rukovodyashchiy dokument. Avtomatizirovannyye sistemy. Zashchita ot nesanktsionirovannogo dostupa k informatsii. Klassifikatsiya avtomatizirovannykh sistem i trebovaniya po zashchite informatsii [Elektronnyy resurs]. [FSTEC of Russia. Guidance document. Automated systems. Protection against unauthorized access to information. Classification of automated systems and requirements for information protection [Electronic resource]. URL: <https://fstec.ru/tekhnicheskaya-zashchita-informatsii/dokumenty/114-spetsialnye-normativnye-dokumenty/384-rukovodyashchij-dokument-reshenie-predsedat-gostekhkommisii-rossii-199-302-gart> (date of access: 03/10/2020). (In Russ)]
17. ISO / IEC 17000: 2004. Conformity assessment. Dictionary and General principles [Electronic resource]. - URL: https://pqm-online.com/assets/files/lib/std/iso_17000-2004.pdf (date accessed: 03/10/2020).
18. ISO / IEC 27002: 2005-2013. Information technology. Security method. Practical rules of information security management [Electronic resource]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/gost-r-iso-mek-17799-2005> (date of access 03/10/2020).
19. Razrabotka modeley i algoritmov otsenki effektivnosti podsystemy zashchity konfidentsial'nykh svedeniy pri yeye proyektirovaniy v sistemakh elektronnoy dokumentooborota OVD: monografiya [Elektronnyy resurs] / Drovni-

- kova I.G. [i dr.]. Voronezh: Voronezh. in-t MVD Rossii, 2019. [Development of models and algorithms for assessing the effectiveness of the subsystem for the protection of confidential information during its design in the systems of electronic document management of the Department of Internal Affairs: monograph [Electronic resource] / Drovnikova I.G. [and etc.]. Voronezh: Voronezh. Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia, 2019. (In Russ)]
20. Zastrozhnov I.I. Modelirovaniye i issledovaniye dinamiki funktsionirovaniya programmnykh sistem zashchity informatsii dlya otsenki i analiza kachestva ikh funktsionirovaniya pri proyektirovanii i upravlenii: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.13.18 / Zastrozhnov Igor' Ivanovich. Voronezh, 2005. 181 s. [Zastrozhnov I.I. Modeling and research of the dynamics of the functioning of information security software systems for assessing and analyzing the quality of their functioning in design and management: dis. ... Cand. tech. Sciences: 05.13.18 / Zastrozhnov Igor Ivanovich. Voronezh, 2005.181 p. (In Russ)]
21. Korniyenko B.Y. Design and research of mathematical model for information security system in computer network / B.Y. Korniyenko, L.P. Galata // Science-Based Technologies. 2017. Vol. 34. Issue 2. pp. 114-118.
22. Nazareth D. System dynamics model for information security management / D. Nazareth, J. Choi // Information & Management. 2015. Vol. 52. Issue 1. pp. 123-134.
23. Kresimir S. The information systems' security level assessment model based on an ontology and evidential reasoning approach / S. Kresimir, O Effectiveness Evaluation on Cyberspace Security Defense System. Hrvoje, G. Marin // Computers & Security. 2015. pp.100-112.
24. White S.C. Comparison of Security Models: Attack Graphs Versus Petri Nets / S.C. White, S.S. Sarvestani // Advances in Computers. 2014. Vol. 94. pp.1-24.
25. Nikishin K. Implementation of time-triggered ethernet using colored Petri NET / K. Nikishin, N. Konnov, D. Pashchenko // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). 2017. pp.1-5.
26. Charaf N. A colored Petri-net model for control execution of distributed systems / H. Charaf, S. Azzouzi // 4th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT). 2017. 277-282.
27. Network security analyzing and modeling based on Petri net and Attack tree for SDN / Y. Linyuan [and others] // 2016 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC). 2016. pp.133-187.

Сведения об авторах:

Бацких Анна Вадимовна, адъюнкт, svatikova96@mail.ru

Конобеевских Владимир Валерьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизированных информационных систем органов внутренних дел, vkonobeevskikh@mail.ru

Ефимов Сергей Венедиктович, кандидат технических наук, доцент, старший преподаватель кафедры пожарной подготовки, sclione@yandex.ru

Information about the authors:

Anna V. Batskikh, adjunct, svatikova96@mail.ru

Vladimir V. Konobeevskikh, Cand. Sci. (Technical), Assoc. Prof. of the Department of Automated Information Systems of Internal Affairs Bodies, vkonobeevskikh@mail.ru

Sergey V. Efimov, Cand. Sci. (Technical), Assoc. Prof., Senior Lecturer of the Department of Fire Training, sclione@yandex.ru

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 24.03.2021.

Принята в печать 01.04.2021.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 24.03. 2021.

Accepted for publication 01.04.2021.

Для цитирования: С. Родригес Васкес, Н.В. Мокрова. Гибридные алгоритмы геопространственного анализа точек расположения плотин в задачах защиты охраняемых районов. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2021; 48 (2): 40-49. DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-2-40-49

For citation: S. Rodriguez Vasquez, N.V. Mokrova. Hybrid algorithms for geospatial analysis of dam location points in protective tasks for protected areas. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2021; 48 (2): 40-49. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-2-40-49

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

УДК 519.6

DOI: 10.21822/2073-6185-2021-48-2-40-49

**ГИБРИДНЫЕ АЛГОРИТМЫ ГЕОПРОСТРАНСТВЕННОГО АНАЛИЗА ТОЧЕК
РАСПОЛОЖЕНИЯ ПЛОТИН В ЗАДАЧАХ ЗАЩИТЫ ОХРАНЯЕМЫХ РАЙОНОВ**

С. Родригес Васкес, Н.В. Мокрова

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет,

129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26, Россия

Резюме. Цель. В последние десятилетия критерии определения потенциальных районов для строительства плотин развивались рука об руку с технологическими инструментами, такими как географические информационные системы (ГИС). Однако критерии сохранения охраняемых районов во многих случаях не учитываются, поэтому биоразнообразие окружающей среды наносится ущерб, который может стать непоправимым. В данной работе представлена оптимизация процесса обнаружения ключевых точек местности путем разработки гибридного алгоритма геопространственного анализа в QGIS. Цель состоит в том, чтобы ускорить вычислительное время, которое является критической переменной для всего процесса обнаружения ключевых точек, и предложить потенциальные области, которые не представляют опасности для биоразнообразия. **Метод.** Используемая стратегия базируется на двух фундаментальных предпосылках: выделении вершин пространственных объектов (рек) и анализе расстояний между пространственными объектами (реки и прилегающие территории). Извлечение вершин позволяет получить потенциальные точки, а анализ расстояния позволит выделить из них те точки, которые находятся в диапазоне, допустимом для расположения плотины при условии нанесения наименьшего возможного ущерба биологическому разнообразию прилегающей территории. Валидация алгоритма была проведена на примере гидрологической сети муниципалитета Маникарагуа, Куба. **Результат.** Полученные результаты сравнивались с точки зрения использованного времени расчета, количества извлеченных допустимых вершин и процента уменьшения общего числа областей. Это сравнение проводилось при использовании одного, двух и трех векторных слоев (.shp) с пространственными объектами, представляющими стратегические охраняемые территории. **Вывод.** Полученные результаты показали, что чем более репрезентативны используемые космические данные (.shp), тем эффективнее будут результаты, полученные алгоритмом по отношению к задачам охраны окружающей среды. Достигнуто снижение до 13% от первоначально обнаруженных ключевых точек.

Ключевые слова: алгоритм геопространственного анализа, анализ расстояний, гидрологическая сеть, ГИС, репрезентативные пространственных объекты

**HYBRID ALGORITHMS FOR GEOSPATIAL ANALYSIS OF DAM LOCATION
POINTS IN PROTECTIVE TASKS FOR PROTECTED AREAS**

S. Rodriguez Vasquez, N. V. Mokrova

*Moscow State University of Civil Engineering (National Research University),
26 Yaroslavskoye Broadway, Moscow 129337, Russia*

Abstract. Objective. In recent decades, criteria for identifying potential areas have evolved hand in hand with technological tools such as geographic information systems (GIS). However, the criteria for the preservation of protected areas are often not taken into account, thus causing damage to environmental biodiversity that can become irreparable. This paper presents the way of optimizing the process of locating key terrain points by developing a hybrid algorithm for geospatial analysis in QGIS. The goal is to speed up computational time, which is a critical variable for the entire key point detection process, and to suggest potential areas that do not pose a threat to biodiversity. **Methods.** The strategy used is based on two fundamental assumptions: identifying the tops of spatial objects (rivers) and analyzing the distances between spatial objects (rivers and adjacent territories). The tops extraction allows obtaining potential points, while the distance analysis allows selecting among them those points that are in the range acceptable for locating a dam, provided that the least possible damage to the biodiversity of the adjacent territory is caused. The algorithm was validated using the example of the hydrological network of Manicaragua, Cuba. **Results.** The results were compared in terms of the calculation time used, the number of valid tops extracted, and the percentage reduction in the total number of areas. This comparison was made using one, two and three vector layers (.shp) with spatial objects representing strategic protected areas. **Conclusion.** The results obtained show that the more representative the space data (.shp) used, the more effective the results obtained using the algorithm are in relation to environmental protection tasks. A reduction of up to 13% from originally detected key points has been achieved.

Keywords: geospatial analysis algorithm, distance analysis, hydrological network, GIS, representative spatial objects

Введение. Социально-экономическая динамика в настоящее время имеет тенденцию к чрезмерной эксплуатации экологических ресурсов и неизбежно приводит к крайне уязвимым экосистемам, которые не способны адаптироваться к прямым или косвенным последствиям действий человека, а это приводит к высоким рискам для сообществ, которые их эксплуатируют или населяют [1]. Экологическая уязвимость – понятие, которое относится к специфической восприимчивости или склонности окружающей среды и природных ресурсов к деградации либо по их физическим, либо по биологическим характеристикам [2,3]. Деградация почв усиливается при наличии экологических рисков, являющихся результатом взаимодействия экстремального природного явления и действий человека в данном пространстве и времени, оказывающих влияние на снижение продуктивности сельского хозяйства и водных ресурсов [4].

Водохранилища принято считать технологическим прорывом в управлении водными ресурсами, эффективными источниками генерации возобновляемой энергии. Однако очень мало говорится о воздействии плотин на окружающую среду, экосистемы и биоразнообразие. Существует множество экологических организаций, которые предупреждают об изменениях, которые происходят при организации крупных искусственных водоемов, в природе, в ландшафтах, в человеческих популяциях, в биологическом разнообразии рек и лесов.

Постановка задачи. Одним из первых шагов в принятии решения о строительстве плотины является выбор района, в котором она будет расположена. Существует множество критериев, которые принимаются во внимание: геологические, гидрологические, топографические, при этом экологические критерии обычно оцениваются как малозначимые, в худшем случае их обычно не принимают во внимание как один из фундаментальных критериев для такого рода процессов. Основной целью данной работы является разработка гибридного алгоритма, который используется при выборе участков для размещения плотин, но который, в свою очередь,

ограничивает обнаружение областями, влияющими как на экосистему, так и на биоразнообразие, окружающее проектируемую гидротехническую инфраструктуру.

Методы исследования. В рассматриваемом случае целью является строительство или расположение плотины в каком-либо районе, фундаментальной предпосылкой – защита окружающей среды и уменьшение ущерба, наносимого экосистеме, в результате получается выбор районов, которые так или иначе удалены от точек, предусмотренных нормативными документами в качестве защитных зон. ГИС-системы имеют определенные функции, которые в совокупности позволяют получить результат (рис. 1).

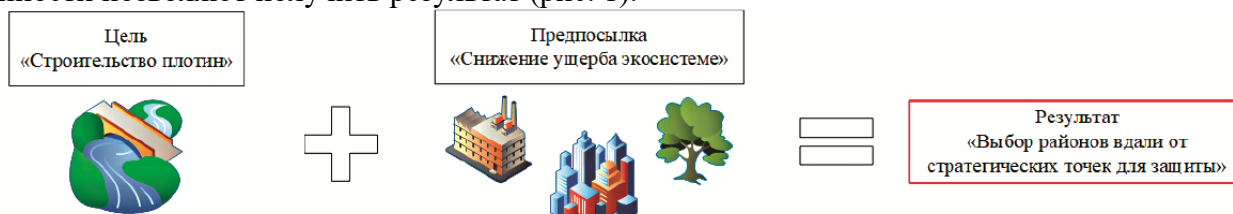


Рис. 1. Общая схема строительства плотин с целью защиты окружающей экосистемы
Fig. 1. A general scheme for the construction of dams to protect the surrounding ecosystem

Однако необходимость использовать функции взаимозаменяемо и раздельно, что делает процесс сложным и трудоемким, а также приводит к потере информации во время вычислительного процесса. В настоящем исследовании предлагается разработка гибридного алгоритма оптимизации, позволяющего ускорить вычислительно этот процесс за счет унификации некоторых из этих функций и их модификаций таким образом, чтобы они могли быть адаптированы к конечной цели, которую планируется достичь в части сохранения биоразнообразия и защиты экосистемы. Ниже приводится общая схема работы предлагаемого гибридного алгоритма (рис. 2).

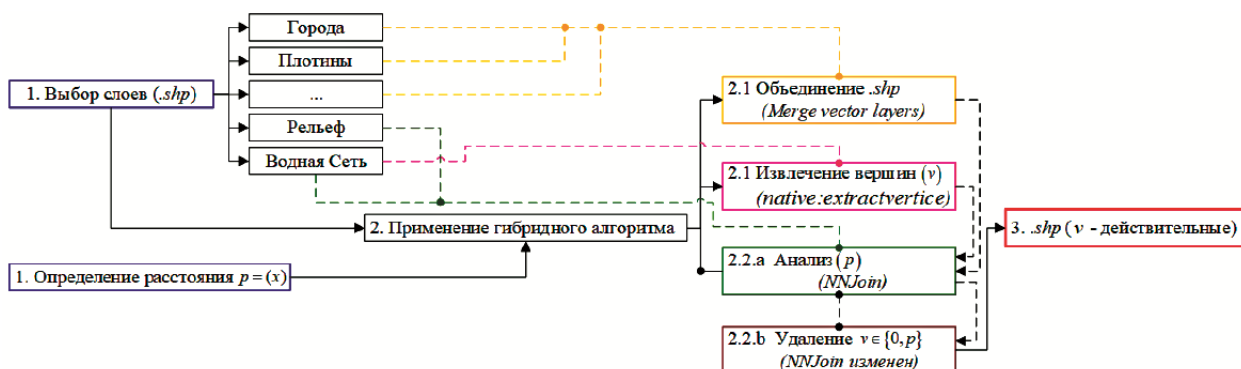


Рис. 2. Общая схема предлагаемого гибридного алгоритма выбора ключевых точек на реке
Fig. 2. The general scheme of the proposed hybrid algorithm for selecting key points on the river

Этот процесс состоит из трех основных этапов. Есть два действия, которые выполняет специалист, использующий алгоритм: выбор слоев и определение расстояния (x). Данное расстояние необходимо обеспечить между точкой, где предполагается разместить плотину, и участками, определенными как охраняемые территории. Для отбора слоев эксперт должен внести слой гидрологической сети анализируемого района, слой уровней кривых, а также слой или слои, которые, по его мнению, содержат районы, которые в соответствии с нормативными документами и региональной политикой предусмотрены в качестве охраняемых территорий (включая города, леса, а также отрасли промышленности и сельского хозяйства). Этот шаг очень важен, потому что его цель – избежать возможных катастроф в случае возникновения атмосферных явлений (наводнений при интенсивных дождях, циклонах, ураганах, землетрясениях) или при разрушении самой гидрологической инфраструктуры. Впоследствии специалист должен определить, на каком расстоянии должна располагаться точка локации по отношению к районам, считающимся охраняемыми. Как только этот первый шаг будет сделан, можно переходить к реализации предложенного гибридного алгоритма.

Алгоритм *Merge vector layers* используется для объединения слоев, содержащих пространственные объекты, представляющие охраняемые территории: (**Вход**: векторные слои охраняемых территорий, **Выход**: векторный слой пространственных объектов) (рис.3).

Merge vector layers: объединяет несколько векторных слоев одного и того же типа геометрии в один. Если таблицы атрибутов различны, то таблица атрибутов результирующего слоя содержит атрибуты всех входных слоев. В том случае, если поля в таблицах данных не совпадают, они добавятся в конец таблицы атрибутов [5]. Если какой-либо входной слой содержит значения z или m , то выходной слой также будет содержать эти значения. Аналогично, если какой-либо из входных слоев является многосоставным, выходной слой также будет многосоставным. При необходимости можно установить целевую систему координат (CRS) для комбинированного слоя. Если он не настроен, CRS будет взят из первого входного слоя. Все слои будут переработаны в соответствии с CRS [6,7].



Рис. 3. Алгоритм Merge vector layers

Fig. 3. Algorithm Merge vector layers

Параллельно с обработкой этого алгоритма выполняется алгоритм *native:extractvertices*: (**Вход**: векторный слой гидрологической сети (тип пространственного объекта: линия), **Выход**: векторный слой вершины $V = [v_1, v_2, \dots, v_n]$ гидрологической сети (тип пространственного объекта: точки)) (рис. 4).

Native:extractvertices: использует векторный слой и генерирует точечный слой с точками, представляющими вершины во входных геометриях. Атрибуты, связанные с каждой точкой, являются теми же, что и атрибуты, связанные с объектом, которому принадлежат вершины. К вершинам добавляются дополнительные поля, указывающие индекс вершин (начинающийся с 0), часть объекта и его индекс внутри части (а также его кольцо для полигонов), расстояние вдоль исходной геометрии и угол биссектрисы вершин для исходной геометрии. [8,9]

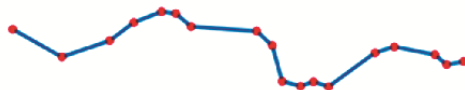


Рис. 4. Алгоритм Native:extractvertices

Fig. 4. Algorithm Native:extractvertices

После извлечения вершин слоя гидрологической сети проводится анализ расстояний между пространственными объектами, представляющими охраняемые территории, и вершинами, полученными из рек. Для выполнения этого анализа используется модифицированный алгоритм *NNJoin*: (**Вход**: векторный слой пространственных объектов и векторный слой вершин, **Выход**: векторный слой вершин (допустимый v)).

NNJoin: соединяет два векторных слоя (входной и соединительный) в зависимости от отношений ближайших соседей, алгоритм работает с евклидовым расстоянием, потому что оно наиболее подходит для расположения в пространстве (Рис. 5). Расстояние между точками i и j является длиной отрезка прямой между этими точками. Расстояние между любыми двумя объектами вычисляется как кратчайшее расстояние между ними. Любой инструмент геообработки, вычисляющий расстояние, будет применять эту логику, включая такие инструменты, как *Ближайший объект*, *Построить таблицу ближайших объектов*, *Расстояние точки* и *Пространственное соединение* (с опцией ближайших совпадений). [10–13]

$$d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (1)$$

Алгоритм *NNJoin* оценивает только расстояния от каждой из вершин до каждого из репрезентативных пространственных объектов, поэтому становится необходимым внести модификация в алгоритм, чтобы он мог быть адаптирован к процессу, который необходимо выполнить. Внесены следующие модификации:

1. В пространственном анализе местности существует слой, представляющий кривые уровня, которые в зависимости от высот действуют как барьеры между двумя точками a и b . Принимая во внимание высоту кривых уровня (h_p) во время анализа расстояния, можно получить наиболее положительные v . Если $h_p \leq h_v$ анализ расстояния выполняется от вершины до пространственного объекта, если $h_p > h_v$ расстояние не анализируется, поскольку считается, что в случае наводнения высота местности в этой точке работает как барьер, и позволяет избежать катастрофических последствий.

2. Другой модификацией, внесенной в *NNJoin*, было удаление вершин, находящихся в диапазоне расстояния $p = (x)$, установленного специалистом в начале процесса. Если $0 \leq v_i \leq p$, то v_i удаляется из набора V . Этот анализ выполняется для каждого из полученных расстояний. После удаления вершин, находящихся в диапазоне расстояний от 0 до p , получается слой, который, наконец, содержит множество вершин, допустимых для возможного расположения плотин, на которых критерии охраны окружающей среды соответствуют своей цели, так как каждая из этих вершин удалена на безопасное расстояние, предотвращающее возникновение катастроф (гибель людей, экономические потери и пр.).

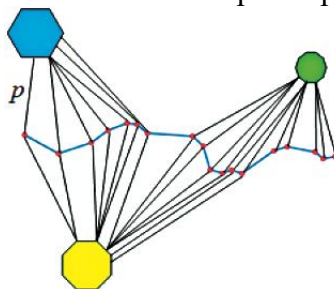


Рис. 5. Алгоритм NNJoin
Fig. 5. Algorithm NNJoin

Обсуждение результатов. Тематическое исследование. Провинциальной делегацией водных ресурсов Вилья-Клары была поставлена задача претворить в жизнь структурные меры, поднятые в Заключительном Докладе «Integrating management of Watersheds and Coastal Area in Caribbean small island developing states» [14] с целью уменьшения последствий стихийных бедствий, вызванных засухой и наводнениями, осуществить строительство новых плотин, в основном плотин и отводов, ректификацию каналов и т.д. Для проведения валидации предложенного гибридного алгоритма в качестве примера был взят муниципалитет Маникарагуа провинции Вилья-Клара, Куба (рис. 6).



Рис. 6. Карта Кубы, провинция Вилья-Клара, муниципалитет Маникарагуа
Fig. 6. Map of Cuba, Villa Clara province, Manicaragua Municipality

Муниципалитет Маникарагуа имеет площадь поверхности 1064,4 км², из которых 309 км² составляют горную зону с ограничениями для развития среды обитания, обусловленными различными факторами риска, которые имеет эта область. Только горная область муниципалитета составляет примерно 29 % от общей территории, выделяясь в провинциальной статистике Вилья-Клары. На севере он граничит с муниципалитетами Санта-Клара, Ранчуэло и Плачетас; на юге-с провинциями Сьенфуэгос и Санкти-Спиритус; на востоке-с провинцией Санкти-Спиритус; на западе – с муниципалитетом Ранчуэло и провинцией Сьенфуэгос. Его рельеф характеризуется речной равниной и слабо расчлененными предгорными высотами. В рамках своих гидрографических характеристик можно отметить, что муниципалитет представляет собой группу районов, считающихся подверженными риску затопления, выделяя район, включенный в долину Джибакоа, которая занимает площадь 12 км², где только сильные дожди приводят к изоляции района, что затрагивает 176 домов, и в общей сложности 486 человек должны быть эвакуированы по этим причинам.

Для оценки предложенного алгоритма были использованы следующие векторные слои: слой гидрологической сети (*SRivers_Man.shp*), слой охраняемых территорий (*Reservoirs_Man.shp*, *City_Man.shp*, *Dams_Man.shp*), слой рельефа (*Contours_Man.shp*). Расстояние, установленное специалистом, было $p = 2$ км. Обработка алгоритма осуществляется по рисункам 7, 8 и 9 соответственно с получением векторного слоя с ключевыми точками для возможного расположения плотин, отвечающих требованиям охраны окружающей среды, в соответствии с выбранными слоями.

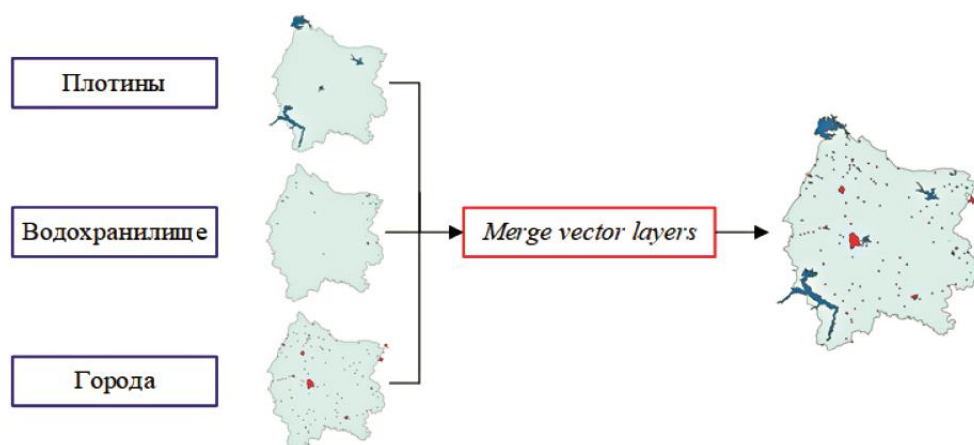


Рис. 7. Алгоритм Merge vector layers
 Fig. 7. Algorithm Merge vector layers



Рис. 8. Алгоритм Native:extractvertices
 Fig. 8. Algorithm Native:extractvertices

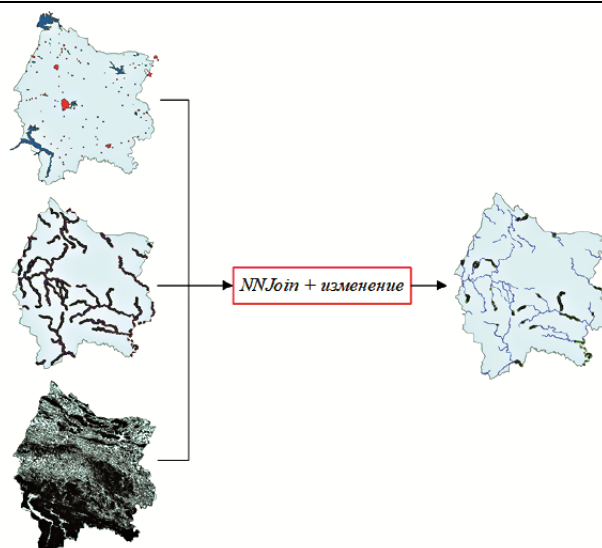


Рис. 9. Алгоритм NNJoin + NNJoin изменен
Fig. 9. Algorithm NNJoin + NNJoin modified

Проведено сравнение результатов, полученных при использовании одного, двух и трех векторных слоев, характеризующих пространственные объекты и представляющие охраняемые территории (табл. 1).

Таблица 1. Сравнение результатов, полученных с помощью гибридного алгоритма с использованием 1-го, 2-х и 3-х векторных слоев

Table 1. Comparison of the results obtained using a hybrid algorithm using the 1st, 2nd, and 3rd vector layers

Количество используемых слоев Number of layers used	<u>1</u> (Слой Городов)	<u>2</u> (Слой Городов, Слой Плотин)	<u>3</u> (Слой Городов, Слой Плотин, Слой Водохранилищ)
Расстояние, установленное специалистом Distance set by a specialist	2 km		
Всего полученных вершин (native:extractvertices) Total received vertices	12591		
Время вычислений Computation time	18 сек	23 сек	60 сек
Количество полученных вершин (NNJoin + NNJoin изменен) Number of vertices obtained	3009	1851	1637
% снижение decline	23,89%	14,70%	13%

Предсказуемо время вычислений при использовании большего числа слоев больше, так как чем больше репрезентативных космических данные должно быть проанализировано, тем больше время вычислений.

Кроме того, это время определяется обработкой расстояний от каждой из вершин, полученных на рис. 8, до каждого из пространственных объектов, присутствующих в слое, полученном на рис. 7.

Несмотря на это, результаты, полученные с точки зрения обнаружения вершин, допустимых для возможного местоположения, указывают на то, что чем более репрезентативные космические данные используются, тем точнее выполняется разграничение потенциальных областей алгоритмом.

Предлагаемый алгоритм обнаруживает только те области, в которых, если бы в нем была расположена плотина, ее строительство повлияло бы на существующую экосистему в этой области. Наконец, можно сказать, что полученные результаты подтверждают правильность предложенного алгоритма, а также его эффективность, позволяющую снизить до 13% количество ключевых точек для возможного расположения плотин.

Вывод. Возможность обнаружения зон расположения плотин и того, что проектируемые гидротехнические объекты в свою очередь не представляют опасности для стратегических охранных зон, является основой для защиты окружающей среды, региональных экосистем. Защита биологического разнообразия, является одной из фундаментальных целей, которые необходимо учитывать при строительстве плотины. В то время как гидротехнические сооружения обеспечивают социальные и экономические выгоды для страны, они также приводят к ущербу природной среде, экономическому ущербу.

Вот почему предложение алгоритма в этом исследовании, означает шаг вперед к сближению между строительством плотин и заботой об окружающей среде.

1. Предлагаемый гибридный алгоритм позволяет выделить районы, которые будут соответствовать правилам, установленным в Заключительном докладе, представленном среди политических и экономических руководящих принципов, установленных на Кубе на период 2016-2021 годов.

2. Результат, полученный при реализации алгоритма в районе Маникарагуа, соответствует предложенной предпосылке защиты окружающей среды и снижения ущерба экосистеме.

3. Алгоритм *Merge vector layers* позволил объединить в один слой пространственные объекты, представляющие стратегические зоны защиты, с целью использования при последующем анализе.

4. Алгоритм *Native:extractvertice* позволил преобразовать линейные объекты, представляющие гидрологическую сеть, в объекты вершинного типа, чтобы облегчить последующий анализ расстояний между объектами различных векторных слоев.

5. Алгоритм *NNJoin* облегчил анализ расстояний между пространственными объектами, представляющими охраняемые территории, и вершинами, представляющими ключевые точки над водными объектами. В этот алгоритм были внесены изменения, позволившие исключить вершины, находящиеся в пределах расстояния, установленного специалистом, выполнившим оценку рельефа.

6. Предложенный алгоритм позволил уменьшить количество установленных ключевых точек до 13%, окончательно обнаружив только те участки, которые не представляют опасности для окружающей экосистемы.

7. Рекомендуется унифицировать работу предложенного в настоящем исследовании алгоритма с использованием методов многокритериального анализа, поскольку считается, что полученный результат будет значительно более ценным для выбора участков для размещения плотин.

Библиографический список:

1. Pokhrel Y. и др. A Review of the Integrated Effects of Changing Climate, Land Use, and Dams on Mekong River Hydrology // Water. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2018. Т. 10, № 3. С. 266 DOI:10.3390/w10030266.
2. Всемирный фонд дикой природы (WWF). Плотины и развитие: новая методическая основа для принятия решений // Отчет всемирной комиссии по плотинам. Москва, 2009. 200 с.
3. Абдразаков Ф., Панкова Т., Орлова С. Прогнозирование вероятности и возможных последствий аварий на плотине // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. Т. 4, № 1. С. 65–72 DOI:10.12737/article_5c50620ee70624.66669200.
4. Azimi Sardari M.R. и др. Modeling the Impact of Climate Change and Land Use Change Scenarios on Soil Erosion at the Minab Dam Watershed // Sustainability. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2019. Т. 11, № 12. С. 3353 DOI:10.3390/su11123353.

5. QGIS project. QGIS Documentation v: 3.4 [Эл. ресурс] //Vector general: Merge vector layers. 2020.URL: https://docs.qgis.org/3.4/en/docs/user_manual/processing_algs/qgis/vectorgeneral.html?highlight=merge#merge-vector-layers.
6. Baghdadi N., Mallet C., Zribi M. QGIS and Generic Tools // QGIS and Generic Tools. 1-е изд. / под ред. Wiley. 2018. Т. 1. С. DOI:10.1002/9781119457091.
7. Kim Y.-K. A Study on Urban Land Cover Classification Using Object-based Image Analysis (OBIA) Techniques // J. Korean Cadastre Inf. Assoc. The Korean Cadastre Information Association, 2020. Т. 22, № 1. С. 122–144 DOI:10.46416/JKCIA.2020.04.22.1.122.
8. QGIS project. QGIS Documentation v:3.4 [Электронный ресурс] // Vector geometry: Extract vertices. 2020.URL: https://docs.qgis.org/testing/en/docs/user_manual/processing_algs/qgis/vectorgeometry.html#id180.
9. Vazquez S.R., Mokrova N. V. Comparison of Applicability of Different Computational Geometry Algorithms for the Detection of Vertices in River Layers in GIS Systems // 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). IEEE, 2020. С. 1–4 DOI:10.1109/FarEastCon50210.2020.9271660.
10. Vázquez S.R., Mokrova N. V. Vector-spatial analysis of gis application layers for placing strategic points in dam design // Строительство и техногенная безопасность. 2021. № 20(72). С. 43–51 DOI:10.37279/2413-1873-2021-20-43-51.
11. ESRI. ArcGIS Pro [Электронный ресурс] // Как инструменты близости вычисляют расстояние. 2020. URL: <https://pro.arcgis.com/ru/pro-app/tool-reference/analysis/how-near-analysis-works.htm>.
12. Bojarska K. и др. Winter severity and anthropogenic factors affect spatial behaviour of red deer in the Carpathians // Mammal Res. Springer, 2020. Т. 65, № 4. С. 815–823 DOI:10.1007/s13364-020-00520-z.
13. Hysa A. Classifying the Forest Surfaces in Metropolitan Areas by Their Wildfire Ignition Probability and Spreading Capacity in Support of Forest Fire Risk Reduction // Integrated Research on Disaster Risks. Springer, Cham, 2021. С. 51–70 DOI:10.1007/978-3-030-55563-4_4.
14. Cuban Environment Agency (AMA). Integrating management of watersheds and coastal area in caribbean small island developing states. Ciudad de la Habana, 2001. 40 с.

References:

1. Pokhrel Y. et. al. A Review of the Integrated Effects of Changing Climate, Land Use, and Dams on Mekong River Hydrology // Water. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2018. V. 10, № 3. P. 266. DOI:10.3390/w10030266.
2. Vsemirnyy fond dikoy prirody (WWF). Plotiny i razvitiye: novaya metodicheskaya osnova dlya prinyatiya resheniy // Otchet vsemirnoy komissii po plotinam. Moskva, 2009. 200 s. [World Wildlife Fund (WWF). Dams and development: A new framework for decision-making // Overview of the report by the World Commission on Dams. Moscow, 2009. P. 200. (In Russ)]
3. Abdrazakov F., Pankova T., Orlova S. Prognozirovaniye veroyatnosti i vozmozhnykh posledstviy avari na plotine // Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova. 2019. Т. 4, № 1. С. 65–72 DOI:10.12737/article_5c50620ee70624.66669200. [Abdrazakov F., Pankova T., Orlova S. Prediction of probability and consequences of accidents on the dam // Bulletin of Belgorod State Technological University named after. V. G. Shukhov. 2019. Vol. 4, No. 1. P. 65–72. DOI:10.12737/article_5c50620ee70624.66669200. (In Russ)]
4. Azimi Sardari M.R. et. al. Modeling the Impact of Climate Change and Land Use Change Scenarios on Soil Erosion at the Minab Dam Watershed // Sustainability. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2019. V. 11, № 12. P. 3353. DOI:10.3390/su11123353.
5. QGIS project. QGIS Documentation v: 3.4 [El. resource] / Vector general: Merge vector layers. 2020. URL: https://docs.qgis.org/3.4/en/docs/user_manual/processing_algs/qgis/vectorgeneral.html?highlight=merge#merge-vector-layers.
6. Baghdadi N., Mallet C., Zribi M. QGIS and generic tools. 1st ed. / ed. Wiley. 2018. V. 1. P. 296. DOI:10.1002/9781119457091.
7. Kim Y.-K. A Study on Urban Land Cover Classification Using Object-based Image Analysis (OBIA) Techniques // J. Korean Cadastre Inf. Assoc. The Korean Cadastre Information Association, 2020. V. 22, № 1. P. 122–144. DOI:10.46416/JKCIA.2020.04.22.1.122.
8. QGIS project. QGIS Documentation v:3.4 [Electronic resource] // Vector geometry: Extract vertices. 2020. URL: https://docs.qgis.org/testing/en/docs/user_manual/processing_algs/qgis/vectorgeometry.html#id180.
9. Vazquez S.R., Mokrova N. V. Comparison of Applicability of Different Computational Geometry Algorithms for the Detection of Vertices in River Layers in GIS Systems // 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). IEEE, 2020. P. 1–4. DOI:10.1109/FarEastCon50210.2020.9271660.
10. Vázquez S.R., Mokrova N. V. Vector-spatial analysis of gis application layers for placing strategic points in dam

- design // Construction and industrial safety. 2021. № 20(72). P. 43–51. DOI:10.37279/2413-1873-2021-20-43-51.
11. ESRI. ArcGIS Pro [Electronic resource] // How proximity tools calculate distance. 2020. URL: <https://pro.arcgis.com/ru/pro-app/tool-reference/analysis/how-near-analysis-works.htm>.
12. Bojarska K. et. al. Winter severity and anthropogenic factors affect spatial behaviour of red deer in the Carpathians // Mammal Res. Springer, 2020. V. 65, № 4. P. 815–823. DOI:10.1007/s13364-020-00520-z.
13. Hysa A. Classifying the Forest Surfaces in Metropolitan Areas by Their Wildfire Ignition Probability and Spreading Capacity in Support of Forest Fire Risk Reduction // Integrated Research on Disaster Risks. Springer, Cham, 2021. P. 51–70. DOI:10.1007/978-3-030-55563-4_4.
14. Cuban Environment Agency (AMA). Integrating management of watersheds and coastal area in caribbean small island developing states. Ciudad de la Habana, 2001. 40 p.

Сведения об авторах:

Родригес Вакес Соланхель, аспирант, магистр информатики; solrusita85@gmail.com

Мокрова Наталия Владиславовна, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры автоматизации и электроснабжения; natali_vm@mail.ru

Information about the authors:

Solangel Rodríguez Vázquez, postgraduate, Master of Computer Science; solrusita85@gmail.com

Nataliya V. Mokrova, Dr. Sci. (Technical), Prof., Prof. of the Department of Automation and Power Supply; natali_vm@mail.ru

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 22.05.2021.

Принята в печать 04.06.2021.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 22.05.2021

Accepted for publication 04.06.2021.

Для цитирования: Ю.С. Труфанов. Разработка автоматизированных балансовых схем товарно-сырьевых парков нефтеперерабатывающего завода. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2021; 48 (2): 50-59. DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-2-50-59

For citation: Yu. S. Trufanov. Development of automated balance flow-sheets in refinery commodity and feedstock depots. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2021; 48 (2): 50-59. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-2-50-59

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

УДК 65.011.4

DOI: 10.21822/2073-6185-2021-48-2-50-59

РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ БАЛАНСОВЫХ СХЕМ ТОВАРНО-СЫРЬЕВЫХ ПАРКОВ НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕГО ЗАВОДА

Ю.С. Труфанов

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

Резюме. Цель. Целью исследования является разработка автоматизированных балансовых схем в товарно-сырьевых парках (ТСП). **Метод.** Применены методы моделирования балансовых схем товарно-сырьевых парков с учетом схем перемещения и отгрузки нефтепродуктов. **Результат.** Приводятся характерные для нефтеперерабатывающего завода (НПЗ) примеры автоматизированных балансовых схем товарно-сырьевых парков с описанием технологических процессов или процессов отгрузки нефтепродуктов. Показаны процессы автоматизации отгрузки железнодорожным, автомобильным, водным транспортом, а также отгрузка по средствам трубопроводов. Графически показываются оперативные и суточные сводки по балансовым объектам, таким как резервуар или группа резервуаров (товарная группа). Приводится пример автоматизированного диспетчерского листа, формирующегося на основе соответствующих автоматизированных балансовых схем. **Вывод.** Внедрение автоматизированных балансовых схем для всех значимых объектов производства на НПЗ, в частности в ТСП, позволит обеспечить наглядность и прозрачность сведений по балансовому объекту, которые впоследствии используются для сведения баланса по предприятию в целом.

Ключевые слова: товарно-сырьевой парк, производственный учет, материальный баланс, резервуар, поток нефтепродуктов, балансовый объект

DEVELOPMENT OF AUTOMATED BALANCE FLOW-SHEETS IN REFINERY COMMODITY AND FEEDSTOCK DEPOTS

Yu. S. Trufanov

Samara State Technical University,
244 Malogvardeyskaya Str., Samara, 443100, Russia

Abstract. Objective. Development of automated balance flow-sheets in commodity and feedstock depots. **Methods.** Methods for modelling balance flow-sheets of commodity and feedstock depots, taking into account petroleum products movement and shipping plans, were applied. **Results.** Examples of automated balance flow-sheets of commodity and feedstock depots specific to refineries are given with the description of technological processes or oil product shipment processes. Rail, road, water, and pipelines shipment automation processes are shown. Operational and daily summaries of balance objects, such as a tank or a group of tanks (commodity group), are graphically shown. An example of an automated dispatch sheet formed on the basis of corresponding automated balance flow-sheets is given. **Conclusion.** The implementation of automated flow-sheets for all significant production facilities at a refinery, in particular for commodity and feedstock depots, will ensure the visi-

bility and transparency of information on balance objects, which is subsequently used to close a balance sheet for the enterprise as a whole.

Keywords: *commodity and feedstock depot, production accounting, inventory balance, reservoir, flow of oil products, balance object*

Введение. На современных нефтеперерабатывающих предприятиях и заводах, не имеющих развитых автоматизированных систем расчета материального баланса (АСРМБ), или имеющих такие системы, но в них не реализован функционал визуализации балансовых объектов, существует разрыв в понимании и применении сведений (первичных и сводных), которые используются для формирования баланса производственных объектов и товарно-сырьевых парков (ТСП). Первичные данные, полученные с автоматизированных приборов или полученные методом ручных замеров, обрабатываются экономистами цехов, сводятся в общие (суточные) отчеты – «сводки», а затем еще раз пересматриваются для сопоставления полученных сведений с другими балансовыми объектами по всей цепочке производства [1]. Такой подход делает непрозрачным процедуру сбора, обработки и подготовки отчетности по балансу предприятия. Затруднительным оказывается понимание оперативным персоналом количественной оценки тех перемещений партий нефтепродуктов (производственных операций), которые они произвели за рабочую смену. Затруднительным также оказывается анализ соответствия и корректности данных по перемещению партий нефтепродуктов производственной службой предприятия.

Постановка задачи. Внедрение на всех этапах производства, на которых осуществляются производственные операции по перемещению партий нефтепродуктов, автоматизированных балансовых схем производственных объектов, в частности, в товарно-сырьевых парках, позволяет оперативному персоналу, производственной службе, экономистам цехов использовать одни и те же первичные производственные данные, анализировать оперативный и суточный баланс производственного объекта сформированный автоматически, определять причины, повлиявшие на баланс, а также оперативно выявлять отказы автоматизированных приборов или грубые ошибки при ручном определении перемещённых количеств нефтепродуктов.

Методы исследования. Разработка автоматизированных балансовых схем товарно-сырьевых парков.

ТСП по производственным операциям характеризуются тем, что, кроме количества принятого и откачанного (отгруженного) нефтепродукта, большое значение имеет необходимость четкой фиксации остатков нефтепродуктов [2, 13, 14, 15]. Остатки фиксируются в каждом резервуаре ТСП, затем вычисляются остатки по группам нефтепродуктов или резервуаров, а также по парку в целом. Для дополнительной информации читателя оговоримся, что для технологических установок остаток также может быть вычислен, но это величина, которая в штатном режиме работы установки из суток в сутки неизменная, поэтому, как правило, сначала анализируется информация о том, что могли быть изменения в режиме работы установки, и только потом анализируется, как это могло повлиять на остаток.

Наибольший интерес для производственной и экономической службы представляют, разумеется, товарные парки и парки, из которых происходит отгрузка или приемка нефтепродуктов.

Обсуждение результатов. На рис. 1 представлена автоматизированная схема товарного парка, который получает с производства компоненты и готовые нефтепродукты и производит отгрузку трубопроводным, водным и железнодорожным транспортом.

На схеме, представленной на рис.1, видно, как отображаются отдельные резервуары, группы резервуаров, трубопроводы (линии откачки/закачки), а также оперативные и суточные счетчики, балансовые таблицы объектов схемы.

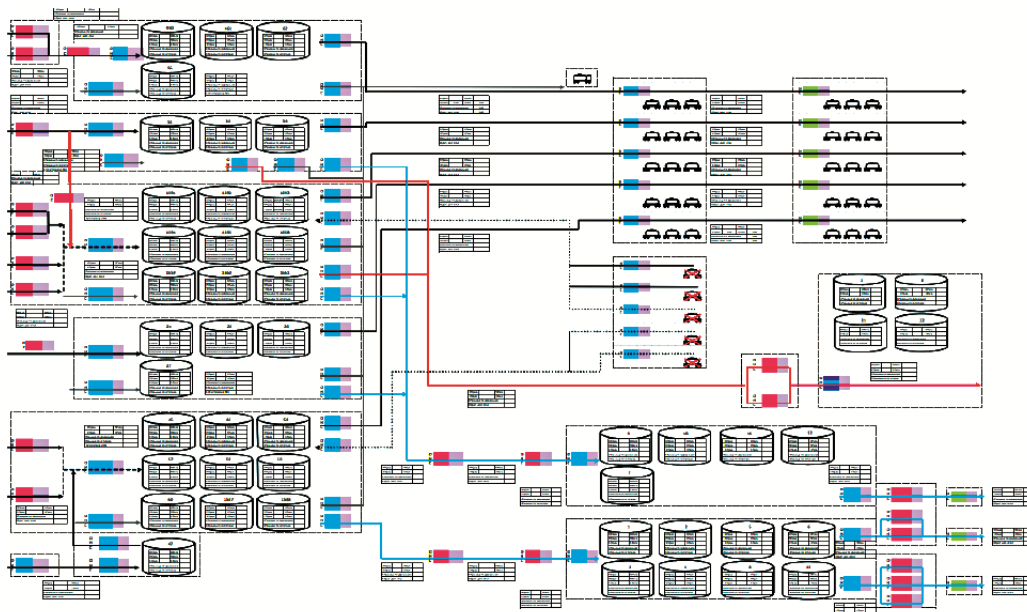


Рис. 1. Схема движения нефтепродуктов в товарной группе резервуаров

Fig. 1. Scheme of movement of petroleum products in the commodity group of tanks

На схеме, представленной на рис. 2, отображается товарный парк, в котором также производится прием с производства и отгрузка товарной продукции, такой, как серная кислота, битумы и коксы. На этой схеме характерным является сравнение количеств нефтепродуктов, отгруженных из резервуаров и количеств нефтепродуктов, прошедших через железнодорожные или автомобильные весы.

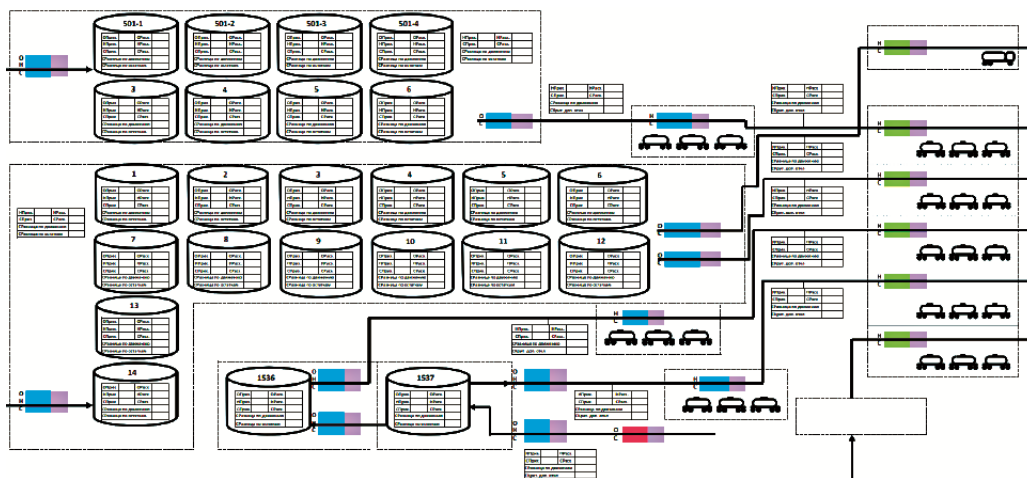


Рис. 2. Схема отгрузки нефтепродуктов через железнодорожные весы

Fig. 2. Scheme of shipment of oil products through railway scales

Пропускная способность ТСП должна соответствовать суммарной выработке всех технологических установок, которые поставляют компоненты в ТСП.

Так, допустимый объем продукции, которую может принять ТСП, равен разнице свободной емкости парка и всех входных потоков в единицу времени, такая оценка позволит определить время, которое ТСП сможет принимать компоненты с технологических установок без отгрузки. Автоматизированные балансовые схемы кроме прочего призваны помогать решать и эту задачу.

Контрольные сопоставления количеств нефтепродуктов «по резервуарам» и «по весам» также должны отображаться на схеме для их оперативного контроля. Для помощи оперативному персоналу и производственной службе правильным будет показывать не только разницу между двумя количествами, но еще и допустимую разницу, вычисленную по критериям допустимых отклонений [1]. Это вызвано тем, что оперативный персонал и производственная служба могут не владеть метрологическим инструментарием и знаниями о применяемых измери-

тельных устройствах и погрешности, чтобы рассчитать это значение самостоятельно. Да и подобный расчет по каждому интересующему трубопроводу в требуемые моменты времени может быть затруднительным. Автоматизация таких расчетов, как раз, и призвана предоставить оперативному персоналу больше сведений об операциях без дополнительных временных затрат и прочих сложностей.

Практически все товарно-сырьевые резервуарные парки НПЗ получают и отгружают продукцию по трубопроводам. Также трубопроводы используются для внутренних перемещений нефтепродуктов между резервуарами в ТСП. Внутренние трубопроводы в ТСП (например, трубопровод закачки, откачки, циркуляции резервуара), как правило, не оснащаются приборами учета перемещенных количеств нефтепродуктов, связано это с целым рядом факторов. Таковыми факторами является большое количество таких трубопроводов, сложность их конфигурации, залегание под землёй, обилие запорной и регулирующей арматуры, невозможность выполнить условия монтажа измерительного устройства и т.д. Изменение количества перемещенного нефтепродукта в таких трубопроводах проводят либо «по резервуару», например, с применением «виртуального расходомера» [3], либо по приборам учета, установленным на трубопроводах закачки или откачки нефтепродукта в парк, или группу резервуаров. Для использования второго варианта измерений необходимо особое внимание уделять «единственности» схемы распределения потоков, так чтобы гарантировалось, что всё количество нефтепродукта, проходящее через, например, трубопровод закачки, на котором установлен прибор учета, попадает в интересующий «внутренний» трубопровод.

Трубопроводы же, по которым в ТСП нефтепродукты поступают с производства и трубопроводы, по которым производится отгрузка потребителю или перекачка на другой объект производства (на технологическую установку или другой ТСП), к внутренним не относятся. Часто трубопроводы, по которым производится получение в ТСП нефтепродуктов, называют потоками или входными потоками. Трубопроводы, по которым происходит отгрузка, называют трубопроводами отгрузки.

Разумеется, требования к точности и метрологическому обеспечению приборов учета на входных потоках и на трубопроводах отгрузки разные. На входных потоках используются приборы учета промышленного класса точности. На трубопроводах отгрузки, если не предусмотрен другой вид измерения, используются коммерческие узлы учета. На рис. 3 представлена схема отгрузки дизельного топлива по трубопроводу с коммерческим узлом учета.

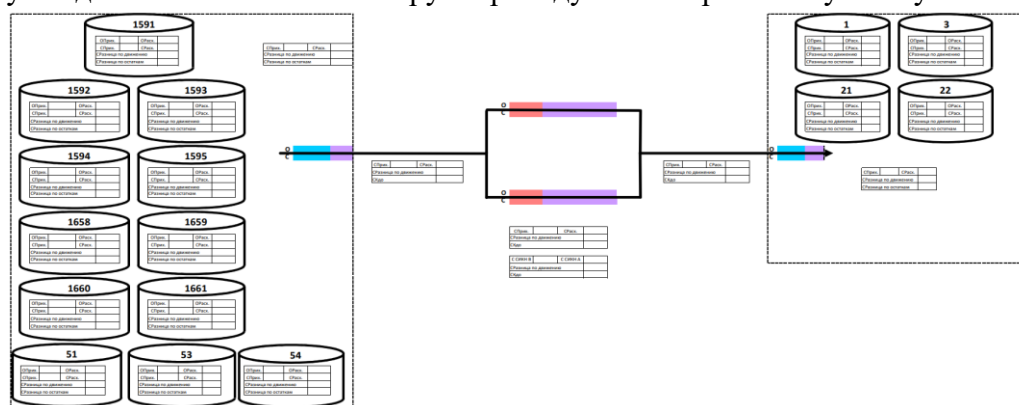


Рис. 3. Схема отгрузки дизельного топлива трубопроводным транспортом
 Fig. 3. Scheme of shipment of diesel fuel by pipeline

Коммерческие узлы учета [12] имеют более высокий класс точности, чем промышленные измерительные устройства. «Активирование» количеств нефтепродуктов, перекачанных по трубопроводам отгрузки через узел учета, происходит по показаниям узла учета. Отображение оперативной и суточной информации на автоматизированных балансовых схемах при отгрузке нефтепродуктов через узел учета крайне важно для подразделений предприятия, которые подписывают акты сдачи приемки нефтепродукта, так как узлы учета являются как бы «границами

баланса предприятия» - после них учет не ведется, баланс не сводится и предприятие как бы существует «от узла и до узла».

Отгрузка нефтепродуктов водным транспортом используется на НПЗ и нефтебазах, разумеется, при наличии водных ресурсов, по которым возможна транспортировка нефтепродуктов, и имеется вся необходимая для этого инфраструктура. Как правило, отгружаются следующие нефтепродукты: судовое маловязкое топливо, дизельное топливо и мазут. Учет при такой отгрузке может быть организован различными способами. «По танкам» - определение количества отгруженного нефтепродукта производится косвенным методом статических измерений, по градуировочной таблице танков нефтяного танкера. «По резервуарам» - определение количества отгруженного нефтепродукта производится косвенным методом статических измерений, по градуировочной таблице резервуаров ТСП. «По узлу учета» - определение количества отгруженного нефтепродукта производится прямым методом динамических измерений по массомерам узла учета.

На рис. 4 и 5 представлены автоматизированные схемы отгрузки дизельного топлива и мазута водным транспортом. Эти автоматизированные балансовые схемы характерны тем, что на них при хорошем уровне учета могут быть отображены все три вида учета, по все цепочке отгрузки «по резервуарам» - «по узлу учета» - «по танкам». В таком случае данные отгрузки будут зафиксированы с «узла учета».

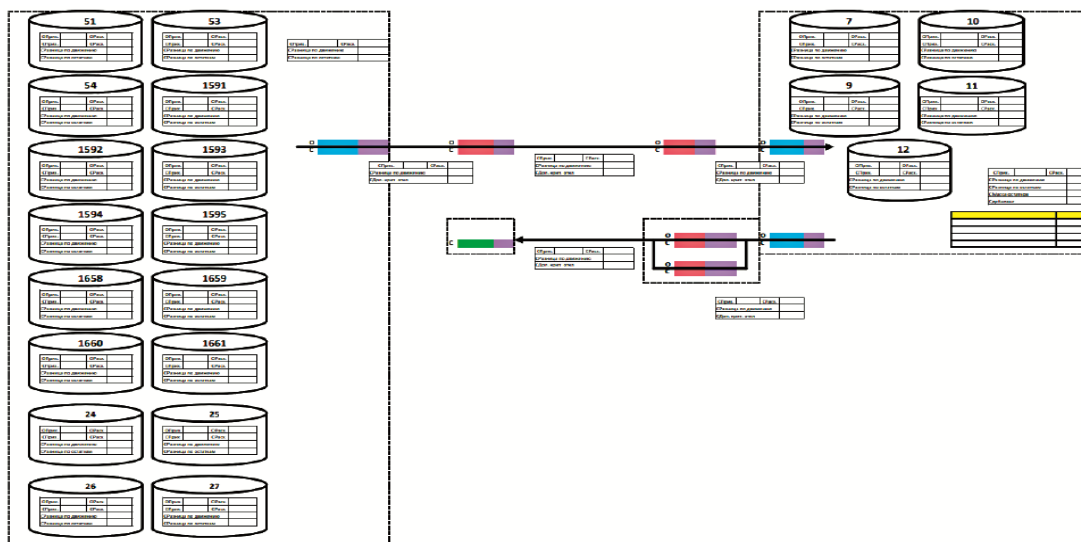


Рис. 4. Схема отгрузки дизельного топлива водным транспортом
Fig. 4. Scheme of shipment of diesel fuel by water transport

На подобных схемах правильно отображать также ТСП предприятия, которые являются источником для ТСП, с которого непосредственно производится отгрузка. Связано это с тем, что в отличие от, например, наливных эстакад железнодорожного транспорта, нефтеналивные терминалы и базы для отгрузки «на воду», как правило, достаточно удалены от основного производства. Связано это с тем, что, как правило, НПЗ строятся на расстоянии от рек и морей. Соответственно, линия (трасса) трубопроводов, идущая от основного предприятия в ТСП, из которого происходит отгрузка водным транспортом, может иметь длину в несколько километров. При такой протяжённости сами трубопроводы становятся емкостью с достаточно значимым количеством нефтепродукта, а, следовательно, для контрольных сопоставлений даже приблизительная оценка баланса трубопроводов может быть полезна, так как позволяет определить, например, участок производства, на котором возможны несанкционированные потери. Отгрузка и транспортировка нефтепродуктов водным транспортом является источником не идентифицированных потерь, наряду с другими видами отгрузки и транспортировки.

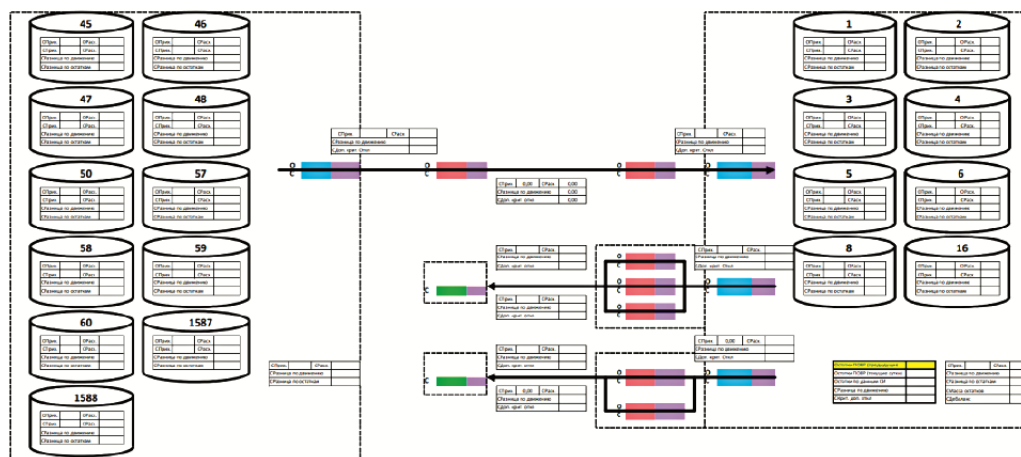


Рис. 5. Схема отгрузки мазута водным транспортом
Fig. 5. Scheme of shipment of fuel oil by water transport

Существуют товарные нефтепродукты, для которых смешение (компаундирование), а простым языком, «приготовление товарного продукта» происходит непосредственно в резервуарах ТСП. Примером этого может быть такой нефтепродукт как бензин. На момент написания настоящей статьи на Российских НПЗ, в основном, готовят бензины с маркой А-92 и А-95 с требуемым классом по содержанию вредных частиц в выхлопе, например, Евро-4 или Евро-5. Процесс компаундирования подразумевает под собой равномерное смешение нескольких компонентов и присадок бензина для получения в товарном продукте требуемых свойств. Процесс и учет процесса компаундирования описан в [4].

Для описания автоматизированных балансовых карт бензин интересен тем, что компоненты, из которых он готовится впоследствии, могут поступать в ТСП с технологических установок как в разные резервуары и потом смешиваться, так и в один резервуар поочередно, а там, после получения результатов анализа дополняться небольшими количествами компонентов и смешиваться в резервуаре.

Также интересно, что при приготовлении бензинов применяются высокооктановые присадки, которые, как правило, поступают по железной дороге от внешнего поставщика. Высокооктановые присадки принимаются и хранятся в отдельных резервуарах ТСП, и вовлекаются в резервуар с компонентами непосредственно при приготовлении товарного продукта. Высокооктановые присадки – это самые дорогие компоненты товарного бензина, поэтому отображение части схемы, на которой отображается их откачка из железнодорожных цистерн, загрузка в резервуары для хранения, а также отображение линий, по которым присадка вовлекается в приготовление, крайне желательна для полноты и информативности автоматизированной балансовой схемы (рис. 6).

На нефтеперерабатывающих заводах в процессе переработки нефти образуется ловушечный продукт. [5]. Источниками для образования ловушечного продукта служат технологические установки, товарно-сырьевые парки, сливные/наливные эстакады и прочие производственные объекты. В основном нефтепродукты, из которых впоследствии будет получен ловушечный продукт, попадают в промышленную канализацию из-за дренирования оперативным персоналом аппаратов, трубопроводов и оборудования на технологических установках, и дренированием («подрезанием») резервуаров в ТСП.

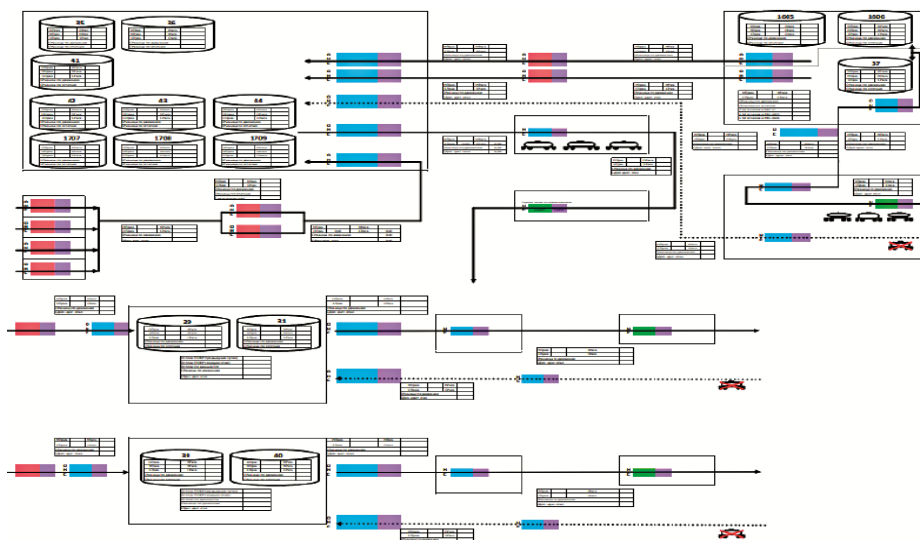


Рис. 6. Схема отгрузки бензина
Fig. 6. Scheme of shipment of gasoline

Далее, эмульсия, содержащая ловушечный продукт улавливается в нефтеловушках (бетонных резервуарах специальной конструкции) из промышленной канализации. Затем происходит очистка через фильтры, и эмульсия, содержащая ловушечный продукт, попадает в резервуары резервуарного парка, где отстаивается для разделения слоев жидкости с высоким и низким содержанием нефтепродуктов. Для материального баланса значимы резервуары, в которых уже завершены процедуры отстоя эмульсии, вода из резервуара отведена и ловушечный продукт «готов». На рис. 7 приведена схема учета ловушечного нефтепродукта при его хранении и вовлечении в мазут.

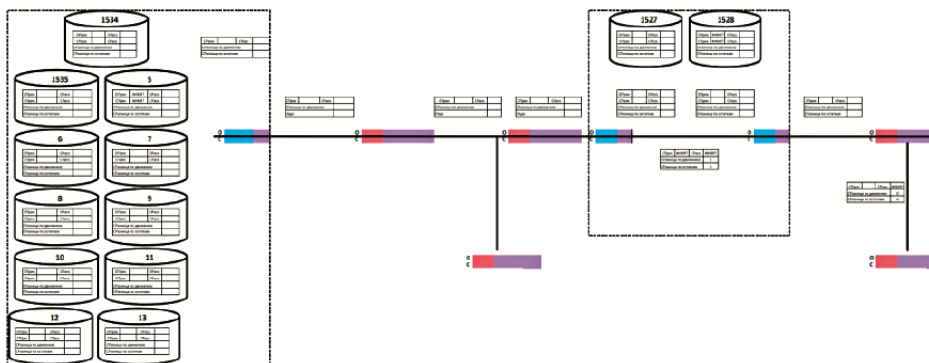


Рис. 7. Схема учета ловушечного нефтепродукта
Fig. 7. Scheme for metering trap oil product

«Готовый» ловушечный продукт учитывается при хранении и движении по средствам пооперационного учета, также могут быть отображены и оперативные значения перемещаемых количеств, но, как правило, ловушечные резервуары не оснащаются автоматизированными измерительными устройствами КИПиА. При вовлечении же ловушечного продукта в мазут, используются сведения от резервуаров ТСП приготовления мазута [10]. Уровень автоматизации ТСП мазута, как правило, позволяет оперировать как с суточными, так и с оперативными сведениями.

Автоматизированные балансовые схемы производственных объектов — это эффективное средство контроля отклонений при перемещении нефтепродукта за интересующий период, например, за предыдущие балансовые сутки. Балансовые сутки длятся 24 часа, но начинаются, как правило, не в 00:00, а, например, в 05:00, связано это с желанием крупных компаний, имеющих предприятия в разных часовых поясах свести общий баланс на одно и то же время.

Первичной информацией для получения сведений по движению нефтепродуктов и ком-

понентов в ТСП за сутки являются результаты пооперационного учета [2]. То есть, фиксация каждой операции по перемещению методом замеров резервуаров на начало и конец операции [6, 7, 11]. А также учет «переходящих» операций. Далее эти операции необходимо учесть за интересующий период и по интересующим резервуарам, группам резервуаров, ТСП в целом.

На рис. 8 приводится пример автоматизированного диспетчерского листа по ТСП. В нем для каждого резервуара фиксируются сведения о состоянии и параметрах резервуара на начало/конец балансовых суток, все производственные операции по закачке/откачке, а также сведения «по двухчасовкам». Сведения «по двухчасовкам» - это сведения о состоянии и параметрах резервуара на конкретные моменты времени с интервалом 2 часа.

Уровни топлива в резервуарах в мм, по часам												по началу периода				по концу периода				
Резервуар	Тип топлива	Наим. продукта	1:00	3:00	5:00	7:00	9:00	11:00	13:00	15:00	17:00	19:00	21:00	23:00	3:00	5:00	7:00	9:00	11:00	13:00
11 (ТСУ)	Нефть	9446	10543	11653	12752	12330	11279	10199	9087	8050	7076	6120	5144	4144	3084	2000	1000	0	0	0
Итого по резервуару			9446	10543	11653	12752	12330	11279	10199	9087	8050	7076	6120	5144	4144	3084	2000	1000	0	0
Итого по ТСП			9446	10543	11653	12752	12330	11279	10199	9087	8050	7076	6120	5144	4144	3084	2000	1000	0	0
Итого по резервуару			9446	10543	11653	12752	12330	11279	10199	9087	8050	7076	6120	5144	4144	3084	2000	1000	0	0
Итого по ТСП			9446	10543	11653	12752	12330	11279	10199	9087	8050	7076	6120	5144	4144	3084	2000	1000	0	0
Итого по резервуару			9446	10543	11653	12752	12330	11279	10199	9087	8050	7076	6120	5144	4144	3084	2000	1000	0	0
Итого по ТСП			9446	10543	11653	12752	12330	11279	10199	9087	8050	7076	6120	5144	4144	3084	2000	1000	0	0
Итого по резервуару			9446	10543	11653	12752	12330	11279	10199	9087	8050	7076	6120	5144	4144	3084	2000	1000	0	0
Итого по ТСП			9446	10543	11653	12752	12330	11279	10199	9087	8050	7076	6120	5144	4144	3084	2000	1000	0	0
Итого по резервуару			9446	10543	11653	12752	12330	11279	10199	9087	8050	7076	6120	5144	4144	3084	2000	1000	0	0
Итого по ТСП			9446	10543	11653	12752	12330	11279	10199	9087	8050	7076	6120	5144	4144	3084	2000	1000	0	0
Итого по резервуару			9446	10543	11653	12752	12330	11279	10199	9087	8050	7076	6120	5144	4144	3084	2000	1000	0	0
Итого по ТСП			9446	10543	11653	12752	12330	11279	10199	9087	8050	7076	6120	5144	4144	3084	2000	1000	0	0
Итого по резервуару			9446	10543	11653	12752	12330	11279	10199	9087	8050	7076	6120	5144	4144	3084	2000	1000	0	0
Итого по ТСП			9446	10543	11653	12752	12330	11279	10199	9087	8050	7076	6120	5144	4144	3084	2000	1000	0	0
Итого по резервуару			9446	10543	11653	12752	12330	11279	10199	9087	8050	7076	6120	5144	4144	3084	2000	1000	0	0
Итого по ТСП			9446	10543	11653	12752	12330	11279	10199	9087	8050	7076	6120	5144	4144	3084	2000	1000	0	0
Итого по резервуару			9446	10543	11653	12752	12330	11279	10199	9087	8050	7076	6120	5144	4144	3084	2000	1000	0	0
Итого по ТСП			9446	10543	11653	12752	12330	11279	10199	9087	8050	7076	6120	5144	4144	3084	2000	1000	0	0
Итого по резервуару			9446	10543	11653	12752	12330	11279	10199	9087	8050	7076	6120	5144	4144	3084	2000	1000	0	0
Итого по ТСП			9446	10543	11653	12752	12330	11279	10199	9087	8050	7076	6120	5144	4144	3084	2000	1000	0	0
Итого по резервуару			9446	10543	11653	12752	12330	11279	10199	9087	8050	7076	6120	5144	4144	3084	2000	1000	0	0
Итого по ТСП			9446	10543	11653	12752	12330	11279	10199	9087	8050	7076	6120	5144	4144	3084	2000	1000	0	0
Итого по резервуару			9446	10543	11653	12752	12330	11279	10199	9087	8050	7076	6120	5144	4144	3084	2000	1000	0	0
Итого по ТСП			9446	10543	11653	12752	12330	11279	10199	9087	8050	7076	6120	5144	4144	3084	2000	1000	0	0
Итого по резервуару			9446	10543	11653	12752	12330	11279	10199	9087	8050	7076	6120	5144	4144	3084	2000	1000	0	0
Итого по ТСП			9446	10543	11653	12752	12330	11279	10199	9087	8050	7076	6120	5144	4144	3084	2000	1000	0	0
Итого по резервуару			9446	10543	11653	12752	12330	11279	10199	9087	8050	7076	6120	5144	4144	3084	2000	1000	0	0
Итого по ТСП			9446	10543	11653	12752	12330	11279	10199	9087	8050	7076	6120	5144	4144	3084	2000	1000	0	0
Итого по резервуару			9446	10543	11653	12752	12330	11279	10199	9087	8050	7076	6120	5144	4144	3084	2000	1000	0	0
Итого по ТСП			9446	10543	11653	12752	12330	11279	10199	9087	8050	7076	6120	5144	4144	3084	2000	1000	0	0
Итого по резервуару			9446	10543	11653	12752	12330	11279	10199	9087	8050	7076	6120	5144	4144	3084	2000	1000	0	0
Итого по ТСП			9446	10543	11653	12752	12330	11279	10199	9087	8050	7076	6120	5144	4144	3084	2000	1000	0	0
Итого по резервуару			9446	10543	11653	12752	12330	11279	10199	9087	8050	7076	6120	5144	4144	3084	2000	1000	0	0
Итого по ТСП			9446	10543	11653	12752	12330	11279	10199	9087	8050	7076	6120	5144	4144	3084	2000	1000	0	0
Итого по резервуару			9446	10543	11653	12752	12330	11279	10199	9087	8050	7076	6120	5144	4144	3084	2000	1000	0	0
Итого по ТСП			9446	10543	11653	12752	12330	11279	10199	9087	8050	7076	6120	5144	4144	3084	2000	1000	0	0
Итого по резервуару			9446	10543	11653	12752	12330	11279	10199	9087	8050	7076	6120	5144	4144	3084	2000	1000	0	0
Итого по ТСП			9446	10543	11653	12752	12330	11279	10199	9087	8050	7076	6120	5144	4144	3084	2000	1000	0	0
Итого по резервуару			9446	10543	11653	12752	12330	11279	10199	9087	8050	7076	6120	5144	4144	3084	2000	1000	0	0
Итого по ТСП			9446	10543	11653	12752	12330	11279	10199	9087	8050	7076	6120	5144	4144	3084	2000	1000	0	0
Итого по резервуару			9446	10543	11653	12752	12330	11279	10199	9087	8050	7076	6120	5144	4144	3084	2000	1000	0	0
Итого по ТСП			9446	10543	11653	12752	12330	11279	10199	9087	8050	7076	6120	5144	4144	3084	2000	1000	0	0
Итого по резервуару			9446	10543	11653	12752	12330	11279	10199	9087	8050	7076	6120	5144	4144	3084	2000	1000	0	0
Итого по ТСП			9446	10543	11653	12752	12330	11279	10199	9087	8050	7076	6120	5144	4144	3084	2000	1000	0	0
Итого по резервуару			9446	10543	11653	12752	12330	11279	10199	9087	8050	7076	6120	5144	4144	3084	2000	1000	0	0
Итого по ТСП			9446	10543	11653	12752	12330	11279	10199	9087	8050	7076	6120	5144	4144	3084	2000	1000	0	0
Итого по резервуару			9446	10543	11653	12752	12330	11279	10199	9087	8050	7076	6120	5144	4144	3084	2000	1000	0	0
Итого по ТСП			9446	10543	11653	12752	12330	11279	10199	9087	8050	7076	6120	5144	4144	3084	2000	1000	0	0
Итого по резервуару			9446	10543	11653	12752	12330	11279	10199	9087	8050	7076	6120	5144	4144	3084	2000	1000	0	0
Итого по ТСП			9446	10543	11653	12752	12330	11279	10199	9087	8050	7076	6120	5144	4144	3084	2000	1000	0	0
Итого по резервуару			9446	10543	11653	12752	12330	11279	10199	9087	8050	7076	6120	5144	4144	3084	2000	1000	0	0
Итого по ТСП			9446	10543	11653	12752	12330	11279	10199	9087	8050	7076	6120	5144	4144	3084	2000	1000	0	0
Итого по резервуару			9446	10543	11653	12752	12330	11279	10199	9087	8050	7076	6120	5144	4144	3084	2000	1000	0	0
Итого по ТСП			9446	10543	11653	12752	12330	11279	10199	9087	8050	7076	6120	5144	4144	3084	2000	1000	0	0
Итого по резервуару			9446	10543	11653	12752	12330	11279	10199	9087	8050	7076	6120	5144	4144	3084	2000	1000	0	0
Итого по ТСП			9446	1																

Библиографический список:

1. Trufanov Y., Mitroshin V. The Criterion of Permissible Deviations Accounting Batches of Petroleum Products. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 753. 082019. 10.1088/1757-899X/753/8/082019.
2. Труфанов Ю.С. Пооперационный учёт количества нефтепродуктов в товарно-сырьевых парках. / Ю.С. Труфанов // "Вестник Науки. Сборник статей по материалам VI международной научно-практической конференции. Актуальные вопросы в науке и практике". 2018. Часть 3(4). С. 114-124.
3. Труфанов Ю.С. О функционале качества специализированного программного обеспечения учета движения массы нефтепродуктов в товарно-сырьевых парках./ Ю.С. Труфанов // Вестник СамГТУ. 2018. № 1. С. 38-46.
4. Гуреев А.А., Жоров Ю.М., Смидович Е.В. Производство высокооктановых бензинов. / А.А. Гуреев, Ю.М. Жоров, Е.В. Смидович. // М.: Химия, 1981. 224 с., ил.
5. Кудинов А.В., Федотов К.В., Рябов В.Г., Журавлев А.В., Братчиков В.В. Рациональное использование ловушечных нефтепродуктов. / А.В. Кудинов, К.В. Федотов, В.Г. Рябов, А.В. Журавлев, В.В. Братчиков // В кн.: Вестник Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. Химическая технология и биотехнология, №12, Пермь, 2011 г.
6. Закожурников, Ю.А. Хранение нефти, нефтепродуктов и газа: учебное пособие для СПО/ Закожурников Ю.А. – Волгоград: Издательский Дом «Ин-Фолио», 2010. 432 с: илл.
7. Труфанов Ю.С. Математическая модель количества нефтепродукта в резервуарном парке/ Ю.С. Труфанов // Научно-технический Вестник ОАО "НК "Роснефть". 2015. № 1. С. 73-75.
8. Копысицкий Т.И., Рзаев Ю.Р. Сведение и оценка точности материального баланса на технологических установках НПЗ // Нефтепереработка и нефтехимия. 2012. № 11. с. 3.
9. Труфанов Ю.С. Повышение достоверности материального баланса НПЗ путем моделирования количества нефтепродукта в резервуарных парках//Бурение и нефть. 2015. № 11. С. 31.
10. Труфанов Ю.С. Динамическое определение количества и потенциала топлива в резервуарном парке./ Ю.С. Труфанов //Вестник СамГТУ. 2017. № 3. С. 188-191.
11. Труфанов Ю.С. Всероссийский конкурс «Новая идея» на лучшую научно-техническую разработку среди молодежи предприятий и организаций топливно-энергетического комплекса. Материалы конкурса – М., ФГАОУ ДПО «ИПК ТЭК», 2015. С. 172-181.
12. Годнев А.Г., Зоря Е.И., Несговоров Д.А., Давыдов Н.В. Коммерческий учет товарных потоков нефтепродуктов автоматизированными системами. / А.Г. Годнев, Е.И. Зоря, Д.А. Несговоров, Н.В. Давыдов. Учебное пособие. М.: Макс пресс, 2008. 430 с.
13. ГОСТ 2517-85: Нефть и нефтепродукты. Методы отбора проб.
14. ГОСТ Р 51069-97 Нефть и нефтепродукты. Метод определения плотности, относительной плотности и плотности в градусах API ареометром.
15. ГОСТ 3900-85 Нефть и нефтепродукты. Методы определения плотности.

References:

1. Trufanov Y., Mitroshin V. The Criterion of Permissible Deviations Accounting Batches of Petroleum Products. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 753. 082019. 10.1088/1757-899X/753/8/082019.
2. Trufanov YU.S. Pooperatsionnyy uchot kolichestva nefteproduktov v tovarno-syr'yevykh parkakh. / YU.S. Trufanov // "Vestnik Nauki. Sbornik statey po materialam VI mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Aktual'nyye voprosy v nauke i praktike". 2018. Chast' 3(4). S. 114-124. [Trufanov Y. S. 2018 Operative Accounting of the Amount of Petroleum Products in Commodity Parks (Bulletin of Science. Collection of articles based on the VI International Scientific Practical Conference. Current issues in science and practice) Part 3(4) pp. 114-124 (In Russ)]
3. Trufanov YU.S. O funktsional'e kachestva spetsializirovannogo programmnoy obespecheniya ucheta dvizheniya massy nefteproduktov v tovarno-syr'yevykh parkakh./ YU.S. Trufanov // "Vestnik SamGTU ". 2018. № 1. S. 38-46. [Trufanov Y S 2018 About the Functionality of the Quality of Specialized Software for Recording the Movement of the Mass of Petroleum Products in Commodity Parks (Bulletin of Samara State Technical University) No. 1 pp. 38-46 (In Russ)]
4. Gureyev A.A., Zhorov YU.M., Smidovich Ye.V. Proizvodstvo vysokooktanovykh benzinov. / A.A. Gureyev, YU.M. Zhorov, Ye.V. Smidovich. // M.: Khimiya, 1981. 224 s., il. [Gureev A.A., Zhorov Yu.M., Smidovich E.V. Production of high-octane gasolines. / A.A. Gureev, Yu.M. Zhorov, E.V. Smidovich. // M : Chemistry, 1981 . 224 p. (In Russ)]
5. Kudinov A.V., Fedotov K.V., Ryabov V.G., Zhuravlev A.V., Bratchikov V.V. Ratsional'noye ispol'zovaniye lovushechnykh nefteproduktov. // V kn.: Vestnik Perms. nats. issled. politekhn. un-ta. Khimicheskaya tekhnologiya i biotekhnologiya, №12, Perm', 2011 g. [Kudinov A.V., Fedotov K.V., Ryabov V.G., Zhuravlev A.V., Bratchikov V.V. Rational use of trapped oil products. / A.V. Kudinov, K.V. Fedotov, V.G. Ryabov, A.V. Zhuravlev, V.V. Bratchikov // In the book: Bulletin perm national research polytechnic university. Chemical technology and biotechnology, No. 12, Perm, 2011(In Russ)]

6. Zakozhurnikov, YU.A. Khraneniye nefi, nefteproduktov i gaza: uchebnoye posobiye dlya SPO/ Zakozhurnikov YU.A. Volgograd: Izdatel'skiy Dom «In-Folio», 2010. 432 s: ill. [Zakozhurnikov Y A 2010 Storage of Oil, Petroleum Products and Gas (A Manual for Open Source Software, Izdatelskiy Dom "In-Folio", Volgograd). (In Russ)]
7. Trufanov YU.S. Matematicheskaya model' kolichestva nefteprodukta v rezervuarnom parke/ YU.S. Trufanov // Nauchno-tehnicheskii Vestnik OAO "NK "Rosneft". 2015. № 1. S. 73-75. [Trufanov Y. S. 2015 Mathematical Model of the Amount of Oil in the Tank Farm (Scientific and Technical Bulletin of OJSC "NK Rosneft") No. 1 pp. 73-75(In Russ)]
8. Kopytskiy T.I., Rzaev YU.R. Svedeniye i otsenka tochnosti material'nogo balansa na tekhnologicheskikh ustanovkakh NPZ // Neftepererabotka i neftekimiya. 2012. № 11. s. 3. [Kopytskiy T I, and Rzaev Y R 2012 Reduction and Assessment of the Accuracy of the Material Balance at Process Plants Refineries (Oil refining and petrochemistry) No. 11, 3(In Russ)]
9. Trufanov YU.S. Povysheniye dostovernosti material'nogo balansa NPZ putem modelirovaniya kolichestva nefteprodukta v rezervuarnykh parkakh./ YU.S. Trufanov // "Bureniye i nefi". 2015. № 11. S. 31. [Trufanov Y. S. 2015 Improving the Reliability of the Material Balance of the Refinery by Modeling the Amount of Oil in Tank Farms (Drilling and oil) No. 11, 31(In Russ)]
10. Trufanov YU.S. Dinamicheskoye opredeleniye kolichestva i potentsiala topliva v rezervuarnom parke./ YU.S. Trufanov // "Vestnik SamGTU ". 2017. № 3. S. 188-191. [Trufanov Y. S. 2017 Dynamic Determination of the Amount and Potential of Fuel in a Tank Farm (Bulletin of Samara State Technical University) No. 3 p.p 188-191(In Russ)]
11. Trufanov YU.S. Vserossiyskiy konkurs «Novaya ideya» na luchshuyu nauchno-tehnicheskuyu razrabotku sredi molodezhi predpriyatiy i organizatsiy toplivno-energeticheskogo kompleksa. Materialy konkursa. M., FGAOU DPO «IPK TEK», 2015. S. 172-181. [Trufanov Y. S. 2015 Vserossiyskiy konkurs "Novaya ideya" na luchshuyu nauchno-tehnicheskuyu razrabotku sredi molodyogi, predpriyatiy I organizatsiy toplivno-energeticheskogo kompleksa. (Proceedings of the competition, Moscow, FGAOU DPO "IPK TEK") pp. 172-181(In Russ)]
12. Godnev A.G., Zorya Ye.I., Nesgovorov D.A., Davydov N.V. Kommercheskiy uchet tovarnykh potokov nefteproduktov avtomatizirovannymi sistemami. / A.G. Godnev, Ye.I. Zorya, D.A. Nesgovorov, N.V. Davydov. Uchebnoye posobiye. M.: Maks press, 2008. 430 s. [Godnev A G, Zorya E I, Nesgovorov D A and Davydov N V 2008 Commercial Accounting of Commodity Flows of Petroleum Products by Automated Systems. Tutorial (Moscow, Max press). (In Russ)]
13. GOST 2517-85: Neft' i nefteprodukty. Metody otbora prob. [State Standard 2517-85: Oil and petroleum products. Sampling methods (In Russ)]
14. GOST R 51069-97 Neft' i nefteprodukty. Metod opredeleniya plotnosti, otnositel'noy plotnosti i plotnosti v gradusakh API areometrom. [State Standard P 51069-97 Oil and petroleum products. Method for determining density, relative density and API gravity with a hydrometer(In Russ)]
15. GOST 3900-85 Neft' i nefteprodukty. Metody opredeleniya plotnosti. [State Standard 3900-85 Oil and petroleum products. Methods for determining the density(In Russ)]

Сведения об авторе:

Труфанов Юрий Сергеевич, соискатель, trufanov@list.ru

Information about the author:

Yuri S. Trufanov, applicant, trufanov@list.ru

Конфликт интересов.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 21.04.2021.

Принята в печать 11.05.2021.

Conflict of interest.

The author declare no conflict of interest.

Received 21.04.2021.

Accepted for publication 11.05.2021.

Для цитирования: Р.А. Хураמיшина, В.В. Соколова. Математическое моделирование ультразвуковой обработки асфальтосмолопарафиновых отложений. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2021; 48 (2): 60-72. DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-2-60-72

For citation: R.A. Khuramshina, V.V. Sokolova. Mathematical modelling of ultrasonic treatment of asphaltene deposits. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2021; 48 (2): 60-72. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-2-60-72

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

УДК 622.692

DOI: 10.21822/2073-6185-2021-48-2-60-72

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ
АСФАЛЬТОСМОЛОПАРАФИНОВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ**

Р.А. Хураמיшина, В.В. Соколова

Уфимский государственный нефтяной технический университет,
450062, г. Уфа, ул. Космонавтов 1, Россия

Резюме. Цель. Удаление асфальтосмолопарафиновых отложений (АСПО) на объектах нефтегазового комплекса является одной из актуальных и важных проблем, что требует значительных материальных и трудовых затрат для ее решения. Сокращение затрат возможно с помощью моделирования процессов обработки отложений на основе создания и внедрения эффективных технических средств. **Метод.** В данной работе рассматривается концептуальный подход к решению проблемы обработки асфальтосмолопарафиновых отложений при транспортировке и хранении нефти, предложены возможные методы ее решения. Дается обзор различных способов очистки объектов транспорта и хранения от АСПО: химические (добавление присадок, растворителей), тепловые (нагрев при помощи специальных устройств или при разработке закачки перегретого пара), механические (использование скребков и поршней), в том числе рассмотрены научные работы по применению ультразвука для ускорения удаления отложений. **Результат.** Предложены наиболее эффективные способы удаления отложений, а также использование удаляемого слоя в качестве вторичного энергоресурса. Применен модельный расчет использования ультразвукового оборудования для удаления отложений. В результате определена скорость движения фронта плавления отложений в зависимости от продолжительности воздействия. **Вывод.** Моделирование ультразвуковой обработки асфальтосмолопарафиновых отложений создает возможность их применения в нефтегазовом комплексе в качестве вторичного сырья, что позволит снизить экологическое воздействие на окружающую среду и повысить эффективность использования оборудования.

Ключевые слова: математическое моделирование, ультразвук, ультразвуковая установка, нефть, асфальто-смолистые парафиновые отложения, насосное оборудование, скважина, резервуар, нефтепровод, вторичное сырье

**MATHEMATICAL MODELLING OF ULTRASONIC TREATMENT
OF ASPHALTENE DEPOSITS**

R.A. Khuramshina, V.V. Sokolova

Ufa State Petroleum Technological University,
1 Kosmonavtov St., Ufa 450064, Russia

Abstract. Objective. The removal of asphaltene deposits at oil and gas facilities is one of the urgent and important problems and requires significant material and labor costs. It is possible to reduce costs by creating and implementing effective technical means, which requires an in-depth study of the processes of organic matter deposition at oil and gas facilities and their use as a secondary raw

material. **Methods.** This paper discusses modern views on the state of the problem of asphaltene deposits in oil shipping and storage equipment and possible ways to solve it. The paper provides an overview of various ways to clean shipping and storage objects from asphaltene deposits: chemical (adding additives, solvents), thermal (heating by special devices or injection of superheated steam during exploitation), mechanical (using scrapers and pistons), and refers, among other things, to scientific works on the use of ultrasound to accelerate the removal of deposits. **Results.** The paper considers methods for removing deposits, as well as using the positive effect of the removed layer as a secondary energy source. A procedure for model calculation of the use of ultrasonic equipment to remove deposits has been developed. As a result, the deposit melting front velocity was determined depending on the duration of exposure. **Conclusion.** Taking into account the positive world experience, the level of development of the ultrasonic method for removing asphaltene deposits in the oil and gas industry and the use of asphaltene deposits as a secondary raw material, this area needs further development. The widespread implementation of equipment and, from the standpoint of rational use of natural resources, the use of deposits as a secondary raw material will increase cost efficiency and equipment efficiency, and reduce environmental impact.

Keywords: mathematical modeling, ultrasound, ultrasonic installation, oil, asphalt-resinous paraffin deposits, pumping equipment, well, reservoir, oil pipeline, secondary raw materials

Введение. Анализ состояния сырьевой базы России показывает, что решить проблему ее воспроизводства только за счет открытия новых месторождений и ввода их в разработку – проблематично, особенно учитывая ситуацию с кризисом в сфере геолого-разведочных работ. В связи с этим возрастает роль технологии повышения нефтеотдачи пластов, которые могут частично компенсировать недостаток ввода новых мощностей за счет повышения отбора нефти на уже введенных месторождениях. Но добиться такого эффекта возможно только при правильном подборе соответствующих инновационных технологий.

Чаще всего особенностью данных месторождений является высокая вязкость нефтей и проблема образования асфальтосмолопарафиновых отложений (АСПО) в насосно-компрессорных трубах, резервуарах для хранения нефти и магистральных трубопроводах.

При добыче и транспортировке парафинистых и высокопарафинистых нефтяных систем на внутренней поверхности нефтепромыслового оборудования происходит образование асфальтосмолопарафиновых отложений (АСПО), что приводит к снижению производительности скважин, уменьшению поперечного сечения нефтепроводов, в некоторых случаях до полного прекращения перекачивания (рис.1).



Рис.1. Пример асфальтосмолопарафиновых отложений (АСПО)

Fig. 1. An example of asphalt-resin-paraffin deposits (ARPD)

Кроме того, накопление АСПО ведет к затруднению обследования состояния резервуаров, а также все это приводит к снижению технико-экономических показателей работы резервуаров и транспортной системы в целом. Для эффективной борьбы и очистки с объектов добычи, транспорта и хранения нефти от асфальтосмолопарафиновых отложений (АСПО), механических примесей и воды необходимо выяснить причину и установить основные закономерности образования данных отложений. Образование осадка в насосно-компрессорных трубах и в объектах транспорта и хранения нефти связано с последующим осаждением твердой фазы. От физико-химических, термодинамических факторов, реологических свойств, конструктивных особенностей трубопроводов и ряда других факторов зависит выделение твердой фазы, а от

технико-эксплуатационных и конструктивных особенностей резервуаров зависит интенсивность накопления отложений. К числу основных факторов, существенно влияющих на интенсивность отложений парафина, относится гидродинамическая характеристика потока.

При длительном хранении нефти разной плотности и вязкости с учетом постоянно меняющегося температурного режима хранения, вызванного переменой климатических условий, на днище и стенках оборудования происходит скапливание различных отложений. Очистка и эксплуатация оборудования и резервуаров от отложений является опасной и трудоемкой работой, которая требует значительных материальных затрат.

Постановка задачи. Основная цель настоящего научного исследования состоит в обобщении существующих методов удаления АСПО и в моделировании на этой основе возможности их ультразвуковой обработки.

Известно, что в настоящее время, как в России, так и за рубежом для контроля АСПО в нефтегазовой отрасли существуют и активно применяют несколько наиболее известных способов, подробно описанных в статье [2], которые позволяют с определенной эффективностью предупредить или устранить данную проблему (рис 2).

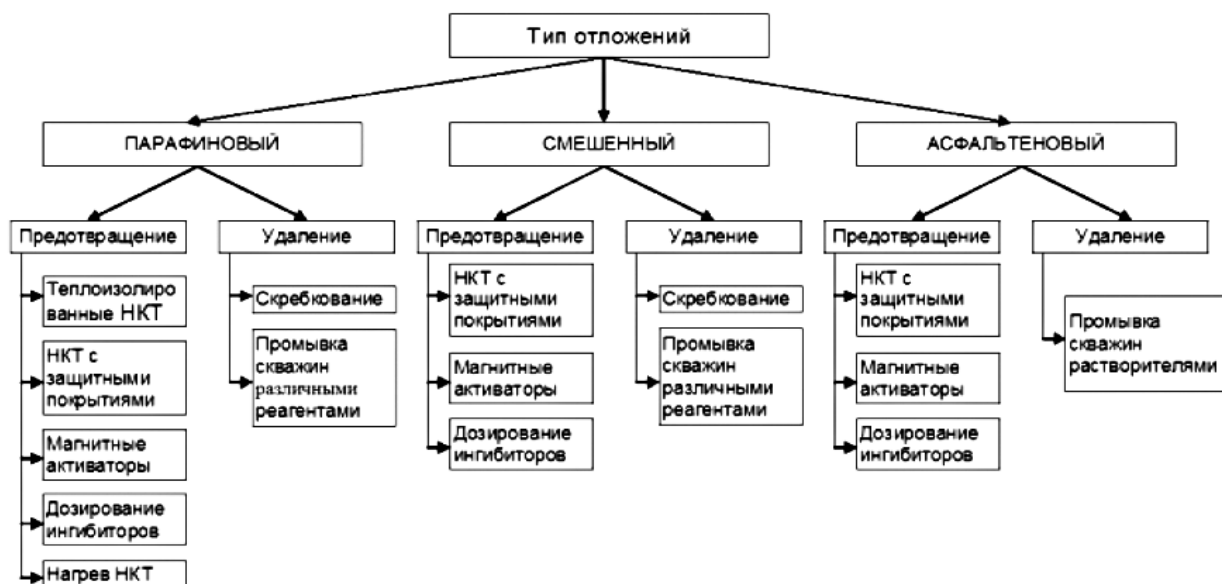


Рис 2. Депарафинизация АСПО
 Fig. 2. Dewaxing of ARPD

Методы исследования. Самым распространённым методом удаления АСПО в силу своей дешевизны и простоты реализации является «горячая» обработка. Однако из-за высокой степени плотности и высокой температуры плавления отложений асфальтенового типа эти методы теряют эффективность с ростом доли асфальтенов в составе отложений.

Механические методы удаления органических отложений основаны на удалении отложений с внутренней поверхности насосно-компрессорных труб специальными устройствами (скребками) во всём интервале образования отложений. Технология удаления АСПО с помощью скребков заключается в спуске в НКТ специального скребка с последующим подъемом на поверхность.

Применение того или иного греющего кабеля определяется способом добычи нефти. Для скважин, оснащенных ШГН, нагреть скважинную жидкость можно с помощью нагревательного кабеля, проложенного только снаружи НКТ (рис. 3), так как внутри НКТ находится штанга. Для скважин, оснащенных ЭЦН, а также фонтанных и газлифтных нагреть скважинную жидкость можно с помощью самонесущего нагревательного кабеля, опускаемого в НКТ (рис. 4б) через лубрикатор.

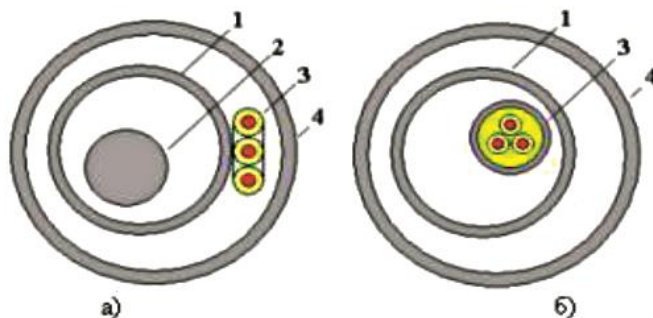


Рис. 3. Расположение нагревательных кабелей в скважине

Fig. 3. Location of heating cables in the well

а) скважина с ШГН, б) скважины с ЭЦН, фонтанные и газлифтные: 1 – насосно-компрессорные труба; 2 - штанга насоса; 3 - кабель; 4 - обсадная колонна
 a) well with sucker-rod pumping pump, b) wells with ESP, flowing and gas-lift: 1 - tubing; 2 - pump rod; 3 - cable; 4 - casing

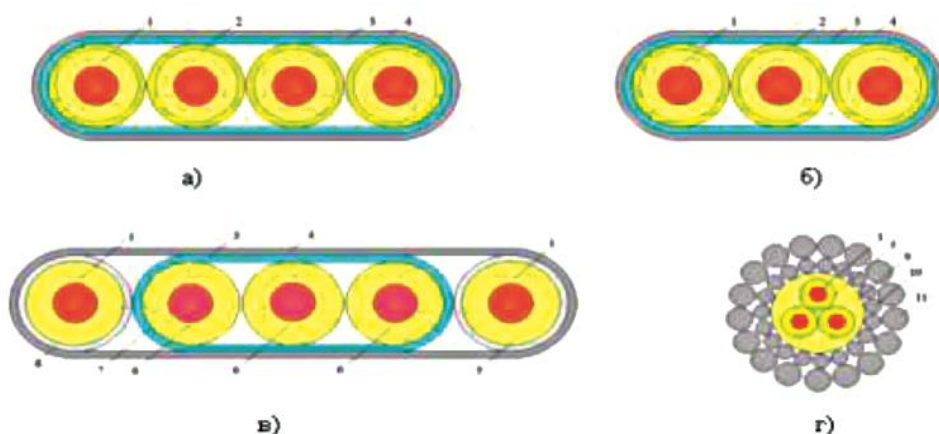


Рис. 4. Поперечное сечение кабелей

Fig. 4. Cross-section of cables

а) и б) плоские нагревательные кабели; в) комбинированный нагревательно-силовой кабель; г) самонесущий нагревательный кабель: 1 - нагревательная жила, 2 - двухслойная изоляция из полимерного материала с обмоткой, 3 - подушка под броню, 4 - броня из стальной оцинкованной профилированной ленты; 5 - изоляция нагревательной жилы из полимерного материала; 6 - три силовые жилы; 7 - изоляция силовых жил; 8 - металлический теплоотводящий экран; 9 - оболочка, 10, 11 - двухслойная броня из стальных оцинкованных проволок

a) and b) flat heating cables; c) combined heating and power cable; d) self-supporting heating cable: 1 - heating conductor, 2 - two-layer insulation made of polymer material with a winding, 3 - cushion under the armor, 4 - armor made of galvanized steel profiled tape; 5 - insulation heating core made of polymeric material; 6 - three power cores; 7 - insulation of power conductors; 8 - metal heat sink; 9 - sheath, 10, 11 - double-layer armor made of galvanized steel wires

На рис. 5 дан сравнительный анализ двух вариантов. Видно, что при мощности 100 Вт/м температура нефти в НКТ составит 47°C, в то время как при нагреве самонесущим кабелем, расположенным в НКТ, - 43°C при мощности 24 Вт/м. Следовательно, нагрев кабелем, расположенным внутри НКТ, требует в несколько раз меньшей мощности, чем нагрев кабелем, расположенным снаружи НКТ.

Существующий механический метод очистки также не дает высоких результатов, за исключением пропуска скребков на линейной части магистральных нефтепроводов, где высокие скорости потока позволяют обеспечить необходимые усилия воздействия на плотные слои АСПО, а частота пропусков препятствует образованию отложений большой толщины [3]. В этом случае, а также в случае удаления АСПО в транспорте и хранения нефти более эффективным становится применение химических методов защиты.

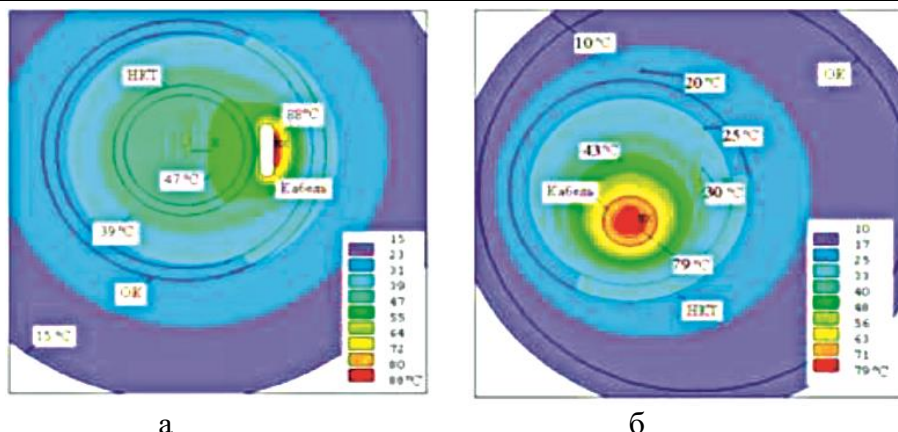


Рис. 5. Распределение температуры в поперечном сечении скважины

Fig. 5. Temperature distribution in the cross-section of the well

а) при мощности 100Вт/м для кабеля, расположенного с внешней стороны НКТ; б) при мощности 24Вт/м для кабеля, расположенного внутри НКТ

a) at a power of 100 W / m for a cable located on the outside of the tubing; б) at a power of 24W / m for a cable located inside the tubing

К распространённым методам удаления АСПО с внутренних поверхностей оборудования относят гидрохимический способ, при котором с помощью химических реагентов происходит промывание резервуаров, механизированный способ очистки путем подачи горячей воды под давлением с помощью гидромониторов, обработкой верхней поверхности нефтехранилищ перегретым паром в течение нескольких дней с последующей механической очисткой, а также использование оборудования струйной абразивной очистки [4]. Данный метод значительно сокращает время очистки, является экономически эффективным и экологически безопасным, но также имеет некоторые отрицательные свойства. К недостаткам механизированного способа очистки резервуаров можно отнести необходимость откачки загрязненной воды на очистные сооружения и относительно большие потери легких фракций из нефтяных остатков, большой расход тепловой энергии на нагрев холодной воды.

Химические методы широко используются для удаления АСПО, но довольно дорогостоящие и оказывают большое экологическое воздействие на окружающую среду. Помимо этого агрессивные реагенты сокращают срок службы металлических частей скважин, причиняя прямые убытки добывающим компаниям. Химические методы позволяют увеличить нефтеотдачу на 25...30 % и имеют экономическую эффективность – 648 р./т [0].

Тепловые - весьма эффективные методы. Они основаны на способности парафина плавиться при температурах выше 50°C и стекать с нагретой поверхности. Осаждение парафина сильно зависит от температуры, поэтому термические методы могут быть очень эффективны как для предотвращения, так и для устранения АСПО [6]. Недостатки термических методов заключаются в высокой энергоёмкости, электро- и пожароопасности, ненадежности и низкой эффективности.

Как видим, что в настоящее время эффективность работ по удалению АСПО невысока. Все вышеперечисленные методы требуют больших материальных затрат, не соответствуют современным требованиям по безопасности и экологичности работ, при этом эффективность их также не может оцениваться как достаточно высокая, так как часто требует увеличения количества повторных операций. Поэтому вопрос разработки новых альтернативных методов удаления накопившихся отложений все еще актуален.

В последние годы среди способов очистки объектов нефтегазового комплекса от АСПО появились новые перспективные надежные, рациональные, результативные и экологически безопасные направления, основанные на применении воздействия на нефтяной поток физических полей (магнитными, ультразвуковыми, вибрационными и др.).

Ультразвуковая обработка (УЗ), вследствие кавитации, приводит значительному повышению скорости химических реакций. Под действием пульсирующих пузырьков и

ударных волн разрушаются агрегаты твердой фазы. УЗ диспергирование проходит успешно при условии, что напряжение, действующее на частицу при захлопывании кавитационной полости, выше реальной прочности измельчаемых материалов. Таким образом, активно воздействуя на кинетику химических реакций и обеспечивая стимуляцию тепло- и массообменных процессов, УЗ способствует увеличению производительности различных технических систем и снижению их энергоемкости и, за небольшим исключением позволяет достичь высокой дисперсности практически любых твёрдых материалов [7]. Интересным вопросом является возможность применения ультразвука совместно с другими методами.

Модельный расчет применения ультразвукового оборудования для удаления АСПО. Предлагается, что в резервуар с нефтью и отложениями помещается ультразвуковой излучатель, соответственно он занимает положение на границе фаз – «нефть-отложение». Излучатель можно помещать в резервуар, который выведен из эксплуатации, так и в резервуар во время эксплуатации. Далее излучатель включается, и вокруг него нефть с отложениями нагревается, происходит расплавление АСПО, и радиус границы фаз увеличивается.

Ожидается, что по мере увеличения данного радиуса эффективность такого подхода снижается, и необходимо переместить излучатель в новую точку. По мере образования значительного количества жидкой фазы, то есть расплавленных отложений, становится возможным ее откачка из резервуара или иной способ удаления. При воздействии ультразвука происходит плавление АСПО. Соответственно все пространство в резервуаре можно условно поделить на следующие составляющие: жидкая фаза, то есть нефть плюс растворенный АСПО; фронт плавления АСПО, то есть объем малой толщины, с температурой, равной температуре кристаллизации АСПО; твердая фаза, то есть АСПО.

Произведем моделирование распространения тепла. Полагаем, что излучатель имеет сферическую форму. Применим формулу для распространения тепла в сферических координатах:

$$c_v \left(1 + \frac{\chi_0}{r} e^{-ar}\right)^{-1} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right), \quad (1)$$

где T – температура нефти/АСПО в исследуемом объеме; r – радиус (расстояние до начала координат); c_v – объёмная теплоёмкость нефти/АСПО; λ – коэффициент теплопроводности нефти/АСПО.

В рамках данной модели предполагается зависимость температуры только от радиуса и времени $T(r, t)$ (сферическая симметрия). Параметр a – коэффициент затухания ультразвуковых волн в нефти/АСПО; χ_0 – коэффициент, отражающий свойства среды и параметры ультразвуковых волн. Для расчёта запишем уравнение в виде

$$c_{va} \left(1 + \chi_0 \frac{1}{r} \cdot e^{-ar}\right)^{-1} r^2 \frac{\partial T_a}{\partial t} = \left(\frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_a r^2 \frac{\partial T_a}{\partial r} \right) \right) \quad (2)$$

Будем использовать классические разностные схемы для численного решения параболического уравнения общего вида

$$c(r, t) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left(k(r, t) \frac{\partial T}{\partial r} \right) + f(r, t), \quad (3)$$

при проведении основного расчёта

$$c(r, t) = c_{va} \left(1 + \chi_0 \frac{1}{r} \cdot e^{-ar}\right)^{-1} r^2, \quad k(r, t) = \lambda_a r^2, \quad f = 0. \quad (4)$$

Введём на отрезке $[r_0, r_{max}]$ равномерную сетку с шагом $h = (r_{max} - r_0)/n$ и узлами $x_i = r_0 + ih$ ($i = 0, \dots, n$).

Аналогично для j -го шага по времени вводим $t_j = j\tau$, $j = 1, \dots, m$, шаг по времени равен $\tau = T/m$.

Разностная схема будет по очереди вычислять значение температуры в узлах:

$$u_i^j = T(x_i, t_j) \quad (5)$$

Основная часть консервативной разностной схемы второго порядка [17] может быть записана в следующем виде:

$$\rho_{i,j} \frac{u_i^{j+1} - u_i^j}{\tau} = \sigma \Lambda^j u^{j+1} + (1 - \sigma) \Lambda^j u^j + \varphi_{i,j}, \quad (6)$$

где оператор Λ^j аппроксимирует приток тепла в узел j из соседних узлов и имеет вид

$$\Lambda^j u^k = \frac{1}{h} \left(a_{i+1,j} \frac{u_{i+1}^k - u_i^k}{h} - a_{i,j} \frac{u_i^k - u_{i-1}^k}{h} \right) \quad (7)$$

коэффициенты $\rho_{i,j}$, $a_{i,j}$, $\varphi_{i,j}$ соответствуют средним значениям c, k, f на отрезках и могут быть вычислены различными способами [17].

В данной работе используется простейший стандартный вариант:

$$\rho_{i,j} = \frac{c(x_i - \frac{h}{2}, t_j + \frac{\tau}{2}) + c(x_i + \frac{h}{2}, t_j + \frac{\tau}{2})}{2}, \quad (8)$$

$$\varphi_{i,j} = \frac{f(x_i - \frac{h}{2}, t_j + \frac{\tau}{2}) + f(x_i + \frac{h}{2}, t_j + \frac{\tau}{2})}{2}, \quad (9)$$

$$a_{i,j} = \frac{k(x_i - h, t_j + \frac{\tau}{2}) + c(x_i, t_j + \frac{\tau}{2})}{2}. \quad (10)$$

Уравнения (6) дополняются начальными и граничными условиями для конкретной задачи. При переходе на каждый следующий шаг по времени решается система линейных алгебраических уравнений относительно $u_0^{j+1} \dots u_n^{j+1}$ при известных $u_0^j \dots u_n^j$.

Вид такой системы определяется из (6). Основная разностная схема с весом σ (обычно $\sigma = 0.5$) имеет вид:

$$\begin{aligned} & \left(\rho_{i,j} + \frac{\sigma \tau}{h^2} (a_{i,j} + a_{i+1,j}) \right) u_i^{j+1} - \frac{\sigma \tau}{h^2} a_{i+1,j} u_{i+1}^{j+1} - \frac{\sigma \tau}{h^2} a_{i,j} u_{i-1}^{j+1} = b_{i,j}, \\ & b_{i,j} = \left(\rho_{i,j} - \frac{(1-\sigma)\tau}{h^2} (a_{i,j} + a_{i+1,j}) \right) u_i^j - \frac{(1-\sigma)\tau}{h^2} (a_{i+1,j} u_{i+1}^j + a_{i,j} u_{i-1}^j) + \tau \varphi_{i,j}. \end{aligned} \quad (11)$$

Так как данное уравнение содержит только неизвестные с номерами $i-1, i, i+1$, матрица системы является трёхдиагональной и для решения применяется стандартный метод прогонки [17]. Граничные условия первого рода (для случая известной температуры с возможной зависимостью от времени) принимают вид

$$u_0^{j+1} = T_L(t_{j+1}), \quad u_n^j = T_R(t_{j+1}). \quad (12)$$

Граничное условие второго рода

$$\left(-k \frac{\partial u}{\partial x} \right) \Big|_{x=R_0} = Q_L(t) \quad (13)$$

может быть с точностью до h^2 аппроксимировано выражением [17]:

$$a_{1,j} \left[\sigma \frac{u_1^{j+1} - u_0^{j+1}}{h} + (1 - \sigma) \frac{u_1^j - u_0^j}{h} \right] = -Q_{L,j} - \frac{h}{2} f_{0,j} + \frac{h}{2} \rho_{0,j} \frac{u_0^{j+1} - u_0^j}{\tau}, \quad Q_{L,j} = Q_L \left(t_j + \frac{\tau}{2} \right), \quad (14)$$

что приводит к первому уравнению линейной системы вида

$$\left(\frac{\sigma}{h} a_{1,j} + \frac{h}{2\tau} \rho_{0,j} \right) u_0^{j+1} - \frac{\sigma}{h} a_{1,j} u_1^{j+1} = Q_{L,j} + \frac{1-\sigma}{h} a_{1,j} (u_1^j - u_0^j) + \frac{h}{2} f_{0,j} + \frac{h}{2\tau} \rho_{0,j} u_0^j, \quad (15)$$

Аналогичное условие на правой границе интервала

$$\left(-k \frac{\partial u}{\partial x} \right) \Big|_{x=R_{max}} = Q_R(t), \quad (16)$$

может быть записано в виде

$$-\frac{\sigma}{h} a_{n,j} u_{n-1}^{j+1} + \left(\frac{\sigma}{h} a_{n,j} + \frac{h}{2\tau} \rho_{n,j} \right) u_n^{j+1} = -Q_{R,j} - \frac{1-\sigma}{h} a_{n,j} (u_n^j - u_{n-1}^j) + \frac{h}{2} f_{n,j} + \frac{h}{2\tau} \rho_{n,j} u_n^j, \quad (17)$$

Условие фиксированного потока тепла через сферу

$$r = R_0: \frac{\partial u}{\partial r} \Big|_{x=R_0} = \frac{Q}{\lambda F}, \quad (18)$$

$$\text{с учетом } k = \lambda r^2, \quad (19)$$

$$F = 4\pi R_0^2 \quad (20)$$

соответствует подстановке

$$Q_{L,j} = -\frac{Q}{4\pi}. \quad (21)$$

Одним из часто применяемых методов при решении задач с фазовыми переходами является метод с переменным шагом по времени. В каждый момент t_j положение фронта плавления считается совпадающим с одним из узлов сетки: $s(t_j) = x_k$ и шаг по времени выбирается таким образом, чтобы в момент t_{j+1} фронт оказался в соседнем узле (с некоторой погрешностью аппроксимации): $s(t_j) = x_{k+1}$ (при тепловом потоке направо вдоль оси). Положение фронта задаётся функцией $s(t)$, уравнение теплопроводности (1) решается в двух областях (до и после фронта плавления):

$$\begin{aligned} R_{min} < r < s(t): \lambda = \lambda_n, c_v = c_{vn}, \\ s(t) < r < R_{max}: \lambda = \lambda_a, c_v = c_{va}. \end{aligned} \quad (22)$$

Один из путей определения желаемого шага по времени – использование разностной аппроксимации в условия Стефана

$$\left(\lambda_n \frac{\partial T_n}{\partial r} - \lambda_a \frac{\partial T_a}{\partial r} \right) \Big|_{r=s(t)} = -L\rho_a \frac{ds}{dt}, \quad (23)$$

но в этом случае требуется детальный контроль за устойчивостью процесса.

Для вывода расчётной формулы интегрируем уравнение (3) сначала по переменной r (предполагая зависимости c, k только от r) по двум отрезкам $[R_0, s(t)]$ и $[s(t), R_{max}]$:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{R_0}^{s(t)} c(r)T dr - \frac{ds}{dt} (cT) \Big|_{r=s(t)-0} = k(r, t) \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=s(t)-0} - k(r, t) \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R_0} + \int_{R_0}^{s(t)} f dr, \quad (23)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{s(t)}^{R_{max}} c(r)T dr + \frac{ds}{dt} (cT) \Big|_{r=s(t)+0} = k(r, t) \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R_{max}} - k(r, t) \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=s(t)+0} + \int_{s(t)}^{R_{max}} f dr \quad (24)$$

Просуммируем эти равенства друг с другом с учётом непрерывности профиля температур и известного разрыва теплового потока (условия Стефана, $k = \lambda r^2$)

$$k(r, t) \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=s(t)-0} - k(r, t) \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=s(t)+0} = -L\rho_a r^2 \frac{ds}{dt}. \quad (25)$$

В итоге получим соотношение

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{R_0}^{R_m} c(r)T dr = Q_L - Q_R - L\rho_a s^2 \frac{ds}{dt} + \int_{R_0}^{s(t)} f dr. \quad (26)$$

Интегрируя его по отрезку $[0, t_{j+1}]$, запишем в случае известных постоянных потоков (граничных условий второго рода)

$$\begin{aligned} \int_{R_0}^{R_m} c(r)T(r, t) dr - \int_{R_0}^{R_m} c(r)T(r, 0) dr = & (Q_L - Q_R)t_{j+1} - L\rho_a s^2(s(t) - s(0)) + \\ & + \int_0^{t_{j+1}} \int_{R_0}^{s(t)} f dr, \end{aligned} \quad (27)$$

откуда легко выразить перейти к приближённому соотношению для вычисления t_{j+1} .

При движении фронта слева $s(t_j) = x_j$ и отсутствии источников тепла ($f = 0$) получим

$$t_{j+1} = (Q_L - Q_R)^{-1} \left(h \sum_{i=1}^N \rho_{i,j} u_i^{j+1} - h \sum_{i=1}^N \rho_{i,j} u_i^0 + \rho_a L (x_{j+1})^2 (x_{j+1} - s_0) \right) \quad (28)$$

и шаг по времени

$$\tau_{j+1} = t_{j+1} - t_j. \quad (29)$$

Если тепловой поток на границах не постоянный, например, вычисляется приближенно по условию фиксированной температуры, то вместо полного интегрирования $Q_L - Q_R$ по времени можно ограничиться отрезком интегрирования $[t_j, t_{j+1}]$ и аналогично записать

$$\tau_{j+1} = (Q_L - Q_R)^{-1} \left(h \sum_{i=1}^N \rho_{i,j} u_i^{j+1} - h \sum_{i=1}^N \rho_{i,j} u_i^j + \rho_a L (x_{j+1})^2 h \right). \quad (30)$$

Процесс вычислений для перемещения фронта плавления на один шаг сетки заключается в составлении и решении системы описанной выше системы уравнений с трёхдиагональной матрицей с дополнительной фиксацией температуры T_c в узле x_{j+1} для некоторого шага $\tau_{j+1}^{(0)}$,

вычисления нового шага по времени $\tau_{j+1}^{(1)}$ по формуле (8) или (9) (по полученным ранее значениям температур в узлах сетки u), и повторении процесса до достижения установившегося шага по времени:

$$\left| \tau_{j+1}^{(l)} - \tau_{j+1}^{(l-1)} \right| < \varepsilon \tau_{j+1}^{(l-1)}. \quad (31)$$

Обсуждение результатов. Для численного решения задачи Стефана разработана программа на языке Python, основанная на использовании классической консервативной разностной схемы второго порядка из [17]. Проведём численный расчёт для следующих параметров: $Q=2000$ Вт; $r_0=0,2$ м; $L = 170$ кДж/кг; $T_0 = 20$ °C; $T_{kp} = 30$ °C; $\lambda_n = \lambda_a = 1,4$ Вт/м·°C; $c_{vh} = c_{va} = 2$ кДж/м³·°C. (рис. 6)



```

File Edit View Insert Cell Kernel Widgets Help
In [541]: 2000/4/np.pi
Out[541]: 159.15494309189535

In [542]: prepare_coeffs({'a0':79.3,'chi0': 24.1, 'rho_a':950, 'lambda0':1.4, 'c0':2000000, 'L':170000, 'Tp':30}, integr=False)
#prepare_coeffs({'a0':1, 'chi0': 2, 'lambda0':1, 'c0':1, 'L':0, 'Tp':0}, integr=False)

#y0=RMax-x
#y=solve_heat(200,100,50, left_b={'Flux':2000/4/np.pi}, right_b={'Flux':0},stepmode='FullInt', init=20, moving=True)
y=solve_heat(2000,1000,50, left_b={'T':45}, right_b={'Flux':0},stepmode='StepInt', init=20, moving=True)
#print(t)

plt.xlabel("r, м")
plt.ylabel("T, C")

plt.plot(x,x*0+30,'y-')
plt.plot(x[:,1:],y[:,1:], 'g-')
#ye=sol_func(x, t[-1]); plt.plot(x,ye, 'r'); print('err=',la.norm(y-ye, np.inf))
#print(t)
plt.show()
print(t[-1])
plt.plot(x[80:120], y[80:120], 'bo-')
plt.plot(x[80:120], 0*x[80:120]+Tp, 'y-')

#plt.plot(fro, 'y-')
#lt.plot(x[:,1:],y[:,1:], 'og-')
plt.show()

plt.xlabel("t, мин.")
plt.ylabel("s(t), м")

plt.plot(t/60,front, 'g-')

#y1=solve_heat(200,100,50, left_b={'Flux':2000/4/np.pi}, right_b={'Flux':0},init=20, moving=False)
#front1=front.copy();plt.plot(t/60,front1, 'r-');plt.show()

22721.84193968597
Init u = 20
время расчёта = 4.000

: prepare_coeffs({'a0':79.3,'chi0': 24.1, 'rho_a':950, 'lambda0':1.4, 'c0':2000000, 'L':170000, 'Tp':30}, integr=False)
#prepare_coeffs({'a0':1, 'chi0': 2, 'lambda0':1, 'c0':1, 'L':0, 'Tp':0}, integr=False)

#y0=RMax-x
#y=solve_heat(200,100,50, left_b={'Flux':2000/4/np.pi}, right_b={'Flux':0},stepmode='FullInt', init=20, moving=True)
y=solve_heat(2000,1000,50, left_b={'T':45}, right_b={'Flux':0},stepmode='StepInt', init=20, moving=True)
#print(t)

plt.xlabel("r, м")
plt.ylabel("T, C")

plt.plot(x,x*0+30,'y-')
plt.plot(x[:,1:],y[:,1:], 'g-')
#ye=sol_func(x, t[-1]); plt.plot(x,ye, 'r'); print('err=',la.norm(y-ye, np.inf))
#print(t)
plt.show()
print(t[-1])
plt.plot(x[80:120], y[80:120], 'bo-')
plt.plot(x[80:120], 0*x[80:120]+Tp, 'y-')

#plt.plot(fro, 'y-')
#lt.plot(x[:,1:],y[:,1:], 'og-')
plt.show()

plt.xlabel("t, мин.")
plt.ylabel("s(t), м")

plt.plot(t/60,front, 'g-')

#y1=solve_heat(200,100,50, left_b={'Flux':2000/4/np.pi}, right_b={'Flux':0},init=20, moving=False)
#front1=front.copy();plt.plot(t/60,front1, 'r-');plt.show()

22721.84193968597
Init u = 20
время расчёта = 4.000

```

Рис. 6. Программа на языке Python
Fig. 6. Python program

Пример профиля температуры приведен на рис. 7.

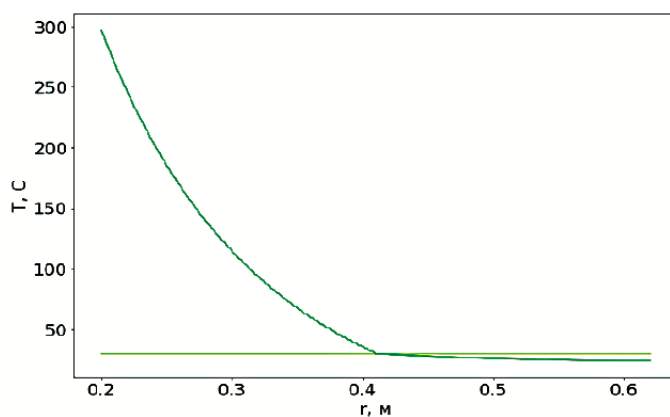


Рис. 7. Пример профиля температуры
Fig. 7. Example of a temperature profile

Завышенная температура объясняется достаточно произвольно заданным значением теплового потока. Перемещение фронта плавления изображено на рис. 8:

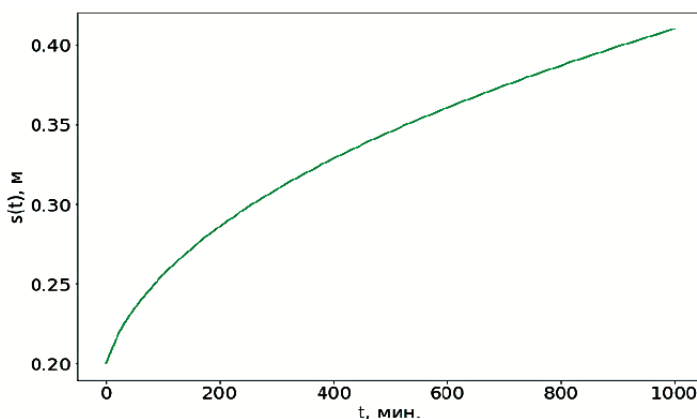


Рис. 8. Перемещение фронта плавления
Fig. 8. Moving the melting front

Изменим граничные условия, зафиксировав про $r = R_0$ температуру $T_n = 45^\circ\text{C}$ (тепловой поток становится переменным, для согласования шага по времени используется формула (9)).

Графики перемещения фронта плавления приведены на Рис. 8. Пунктиром изображено более быстрое перемещение изотермы $T = T_{кр} = 30^\circ\text{C}$ без учёта теплоты плавления вещества (в предположении $L = 0$).

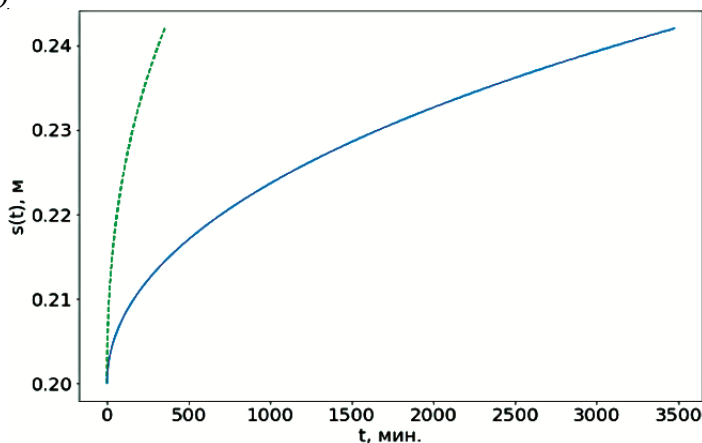


Рис. 9. Перемещение фронта плавления для граничного условия с температурой $T_L = 45^\circ\text{C}$
Fig. 9. Moving the melting front for the boundary condition with temperature $T_L = 45^\circ\text{C}$

Пример профиля температур для данного граничного условия приведён на рис. 10.

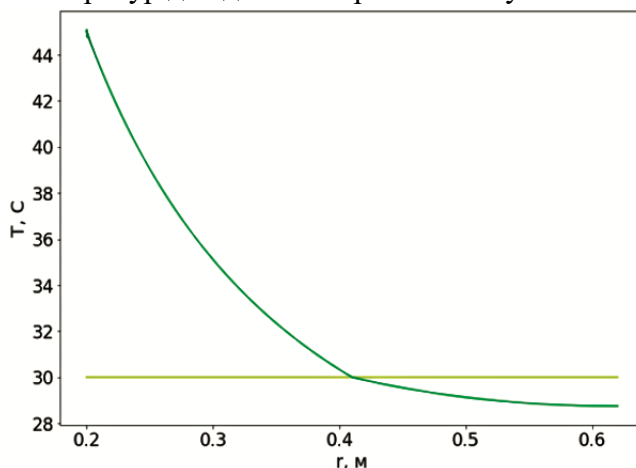


Рис. 10. Пример профиля температуры $T(r)$ для граничного условия $T_L = 45^\circ\text{C}$

Fig. 10. Example of a temperature profile $T(r)$ for the boundary condition $T_L = 45^\circ\text{C}$

Вывод. Разработана математическая модель применения ультразвукового оборудования для удаления АСПО. Приведены результаты математического моделирования распространения тепла.

Область применения ультразвуковой обработки широка: от воздействия его на призабойные зоны пласта и скважин до очистки объектов транспорта и хранения от асфальтосмолопарафиновых отложений.

Библиографический список:

1. Галиакбарова, Э.В, Бахтизин Р.Н, Надыршин, А.С., Галиакбаров, В.Ф. Безопасное энергетически эффективное исключение осадконакопления при хранении нефти в резервуарных емкостях // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2015, №4. С. 142-148.
2. Иванова, Л.В, Буров Е.А., Кошелев В.Н. Асфальтосмолопарафиновые отложения в процессах добычи, транспорта и хранения // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело» 2011, №1. С. 268-284.
3. Hamida T. Effects of Ultrasonic Waves on Immiscible and Miscible Displacement in Porous Media/T. Hamida, T. Babadagli//2005 SPE Technical Conference and Exhibition. Dallas, Texas, 2005.
4. Goswant, T. K. How to Get Rid of Paraffin Deposition in Pipe Line / T. K. Goswant // Chem. Age India. – 1969. Vol. 20. No 4. pp. 15–16.
5. Malykh, N. On Sonocapillary Effect / N. Malykh, V. Petrov // XIII Session of the Russian Acoustical Society. Moscow, 2003.
6. Злобин А.А. К вопросу о механизме действия ингибиторов для защиты от асфальтосмолопарафиновых отложений (АСПО)/А.А. Злобин, И. Р. Юшков // Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. 2011. С. 78–83.
7. Бергман Л. Ультразвук и его применение в науке и технике / Пер. с немец. М.: Иностр. лит., 1957. 726 с.
8. Abramov V.O., Ultrasonic technology for enhanced oil recovery from failing oil wells and the equipment for itsimplemation / Abramov V.O., Mullakaev M.S., Abramova A.V., Esipov I.B., Mason T.J. // Ultrasonics Sonochemistry. 2013. Vol. 20. No. 5. pp. 1289–1295.
9. Abramov O.V, Extraction of bitumen, crude oil and its products from tar sand and contaminated sandy soil under effect of ultrasound / Abramov O.V., Abramov V.O., Myasnikov S.K., Mullakaev M.S. // Ultrasonics Sonochemistry. 2009. Vol. 16. No. 3.pp. 408-416.
10. Хофштаттер Г., Павлов М.В., Мастобаев Б.Н. Применение ультразвука для разрушения асфальтосмолопарафиновых отложений в трубопроводе при транспортировке нефти // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья, 2014. № 3. С. 6–9.
11. Павлов М.В., Применение ультразвука для очистки от асфальтосмолистых и парафиновых отложений на объектах транспорта и хранения нефти: дис. канд. техн. наук: 25.00.19 / Павлов Михаил Валентинович, М., 2019. 133 с.
12. Асылбаев Д.Ф., Муллакаев М.С., Абрамов В.О., Прачкин В.Г. Исследование комбинированного воздействия ультразвука и химических реагентов на реологические свойства нефти Боровского месторождения // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. 2013. № 5. С. 34–36.
13. Beresnev I.A., Johnson P. A., Elastic-wave stimulation of oil production: A review of methods and results, Geophysics, vol. 59, no. 6, pp. 1000-1017, 1994.

14. F. Van der Bas and e. al., "Radial Near Wellbore Stimulation by Acoustic Waves," in SPE International Symposium and Exhibition on Formation Damage Control, Lafayette, 2004
15. Mason T., *Advances in Sonochemistry* // JAI Press. 1 – 1989, 323 p.; 2 – 1991. – 345 p.; 3 – 1993. – P. 328; 4 – 1996. – 351 p.
16. Price G. *Current Trends in Sonochemistry*. L.: Royal Soc. of Chemistry, 1990. 121 p.
17. Самарский А. А. Введение в теорию разностных схем [Текст]. М.: Наука, 1971. 552 с.
18. Zerroukat, Mohamed & Chatwin, Chris. (1997). Computational Moving Boundary Problem. *Journal of Fluid Mechanics*. 343. pp.407-407.
19. Gupta R. S., Kumar D. Variable time step methods for one-dimensional Stefan problem with mixed boundary condition // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1981. Vol. 24. No. 2. pp. 251-259.
20. Кот В.А. Высокоточные полиномиальные решения классической задачи Стефана // *Технические науки*, 2017. №6. С. 112-122.
21. Муллакаев, М.С. Ультразвуковая интенсификация добычи и переработки нефти // М.: ОАО "ВНИИО-ЭНГ", 2014. 168. с.
22. Чесноков А.В. Что ждет сервисные компании в нефтегазовой отрасли России? // *Нефть и Газ Евразия*. 2008. № 10, с. 10-15.

References:

1. Galiakbarova, E.V, Bakhtizin R.N, Nadyrshin, A.S., Galiakbarov, V.F. Bezopasnoye energeticheski effektivnoye isklyucheniye osadkonakopleniya pri khraneniі nefti v rezervuarnykh yemkostyakh // *Elektronnyy nauchnyy zhurnal «Neftegazovoye delo»* 2015, №4. S. 142-148. [Galiakbarova, E. V., Bakhtizin, R. N., Nadyrshin, A. S., Galiakbarov, V. F. Safe energy-efficient exclusion of sedimentation during oil storage in reservoir tanks / / *Electronic scientific journal "Oil and Gas Business"* 2015, No. 4. pp. 142-148. (In Russ)]
2. Ivanova, L.V, Burov Ye.A., Koshelev V.N. Asfal'tosmoloparafinovyye otlozhe niya v protsessakh dobychi, transporta i khraneniya // *Elektronnyy nauchnyy zhurnal «Neftegazovoye delo»* 2011, №1. S. 268-284. [Ivanova, L. V., Burov, E. A., Koshelev, V. N. Asphalt-resin-paraffin deposits in mining, transport and storage processes // *Electronic scientific journal "Oil and Gas Business"* 2011, No. 1. pp. 268-284. (In Russ)]
3. Hamida, T. Effects of Ultrasonic Waves on Immiscible and Miscible Displacement in Porous Media / T. Hamida, T. Babadagli // 2005 SPE Technical Conference and Exhibition. Dallas, Texas, 2005.
4. Goswant, T. K. How to Get Rid of Paraffin Deposition in Pipe Line / T. K. Goswant // *Chem. Age India*. – 1969. Vol. 20. No 4. pp. 15–16.
5. Malykh, N. On Sonocapillary Effect / N. Malykh, V. Petrov // XIII Session of the Russian Acoustical Society. Moscow, 2003.
6. Zlobin, A. A. K voprosu o mekhanizme deystviya ingibitorov dlya zashchity ot asfal'tosmoloparafinovykh otlozheniy (ASPO) / A. A. Zlobin, I. R. Yushkov // *Vestnik PNIPU. Geologiya. Neftegazovoye i gornoye delo*. 2011. S. 78–83. [Zlobin, A. A. On the question of the mechanism of action of inhibitors for protection from asphalt-resin-paraffin deposits (ASPO) / A. A. Zlobin, I. R. Yushkov // *Vestnik PNRPU. Geology. Oil and gas and mining*. 2011. pp. 78-83. (In Russ)]
7. Bergman L. Ultrasound and its application in science and technology / Per. s. nemets. M.: Inostr. lit., 1957. 726 p.
8. Abramov V.O., Ultrasonic technology for enhanced oil recovery from failing oil wells and the equipment for its implementation / Abramov V.O., Mullakaev M.S., Abramova A.V., Esipov I.B., Mason T.J. // *Ultrasonics Sonochemistry*. 2013. Vol. 20. No. 5. pp. 1289–1295.
9. Abramov O.V, Extraction of bitumen, crude oil and its products from tar sand and contaminated sandy soil under effect of ultrasound / Abramov O.V., Abramov V.O., Myasnikov S.K., Mullakaev M.S. // *Ultrasonics Sonochemistry*. 2009. Vol. 16. No. 3.C. 408-416.
10. Khofshtatter G., Pavlov M.V., Mastobayev B.N. Primeneniye ul'trazvuka dlya razrusheniya asfal'tomoloparafinovykh otlozheniy v truboprovode pri transportirovke nefti // *Transport i khraneniye nefteproduktov i uglevodorodnogo syr'ya*, 2014. № 3. S. 6–9. [Hofstatter G., Pavlov M. V., Mastobaev B. N. Application of ultrasound for destruction of asphalt-paraffin deposits in the pipeline during oil transportation//*Transport and storage of petroleum products and hydrocarbon raw materials*, 2014. No. 3. pp. 6-9. (In Russ)]
11. Pavlov M.V., Primeneniye ul'trazvuka dlya ochistki ot asfal'tosmolistykh i parafinovykh otlozheniy na ob"yektakh transporta i khraneniya nefti: dis. kand. tekhn. nauk: 25.00.19 / Pavlov Mikhail Valentinovich, M., 2019. 133 s. [Pavlov M. V., Application of ultrasound for cleaning from asphalt resinous and paraffin deposits at oil transport and storage facilities: dis. cand. tech. nauk: 25.00.19 / Pavlov Mikhail Valentinovich, M., 2019. 133 p. (In Russ)]
12. Asylbayev D.F., Mullakayev M.S., Abramov V.O., Prachkin V.G. Issledovaniye kombinirovannogo vozdeystviya ul'trazvuka i khimicheskikh reagentov na reologicheskiye svoystva nefti Borovskogo mestorozhdeniya // *Oborudovaniye i tekhnologii dlya neftegazovogo kompleksa*. 2013. № 5. S. 34–36. [Asylbaev D. F., Mullakaev M. S., Abramov V. O., Prachkin V. G. Investigation of the combined effect of ultrasound and chemical reagents

- on the rheological properties of Borovskoye oil // Equipment and technologies for the oil and gas industry. 2013. No. 5(In Russ)]
13. Beresnev I.A., Johnson P. A., Elastic-wave stimulation of oil production: A review of methods and results, Geophysics, Vol. 59, No. 6, pp. 1000-1017, 1994.
 14. F. Van der Bas and e. al., "Radial Near Wellbore Stimulation by Acoustic Waves," in SPE International Symposium and Exhibition on Formation Damage Control, Lafayette, 2004
 15. Mason T., Advances in Sonochemistry // JAI Press. – 1 – 1989, 323 p.; 2 – 1991. – 345 p.; 3 – 1993. – P. 328; 4 – 1996. – 351 p.
 16. Price G. Current Trends in Sonochemistry. L.: Royal Soc. of Chemistry, 1990. 121 p.
 17. Samarskiy A. A. Vvedeniye v teoriyu raznostnykh skhem [Tekst]. – M.: Nauka, 1971. – 552 s. [Samarsky A. A. Introduction to the theory of difference schemes [Text]. M.: Nauka, 1971. 552 p. (In Russ)]
 18. Zerroukat, Mohamed & Chatwin, Chris. (1997). Computational Moving Boundary Problem. Journal of Fluid Mechanics. 343. pp. 407-407.
 19. Gupta R. S., Kumar D. Variable time step methods for one-dimensional Stefan problem with mixed boundary condition //International Journal of Heat and Mass Transfer. 1981. T. 24. No. 2. pp. 251-259.
 20. Kot V.A. Vysokotochnyye polinomial'nyye resheniya klassicheskoy zadachi Ctefana // Tekhnicheskiye nauki, 2017. №6. S. 112-122.
 21. Mullakayev, M.S. Ul'trazvukovaya intensivatsiya dobychi i pererabotki nefi // M.: OAO "VNIIOENG", 2014. 168. s. [Mullakaev, M. S. Ultrasonic intensification of oil production and processing / / Moscow: JSC "VNIIOENG", 2014. 168p. (In Russ)]
 22. Chesnokov A.V. Chto zhdet servisnyye kompanii v neftegazovoy otrasli Rossii? // Neft' i Gaz Yevraziya. – 2008. № 10. S. 10-15 [Chesnokov A.V. What is waiting for service companies in the oil and gas industry of Russia? // Oil and Gas Eurasia. 2008. № 10. pp. 10-15. (In Russ)]

Сведения об авторах:

Хурамшина Регина Азатовна, аспирант, Khuramshina.regina@mail.ru

Соколова Виктория Владимировна, кандидат филологических наук, доцент, vsokolova21@yandex.ru

Information about the authors:

Regina A. Khuramshina, Postgraduate, Khuramshina.regina@mail.ru

Viktoriya V. Sokolova, Cand. Sci. (Philological), Assoc. Prof., vsokolova21@yandex.ru

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию 14.05.2021.

Received 14.05.2021.

Принята в печать 01.06.2021.

Accepted for publication 01.06.2021.

Для цитирования: А.С. Гаврилов, А.Е. Сергеев. Меры по повышению энергоэффективности инженерных систем здания. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2021;48(2):73-80. DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-2-73-80

For citation: A.S. Gavrilov, A. E. Sergeev. Measures to improve energy efficiency of building utility systems. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2021; 48(2):73-80. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-2-73-80

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 697

DOI: 10.21822/2073-6185-2021-48-2-73-80

МЕРЫ ПО ПОВЫШЕНИЮ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ ЗДАНИЯ

А.С. Гаврилов, А.Е. Сергеев

Казанский государственный энергетический университет,
420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является определение путей повышения уровня энергоэффективности за счет проведения комплексного анализа инженерных систем дома с учетом существующей модели энергообеспечения и контроля показателей влияния на эффективность работы инженерно-технического оборудования. **Метод.** Основная методика базируется на обследовании уровня энергетической эффективности систем отопления и горячего водоснабжения. **Результат.** В статье рассмотрено понятие энергетической эффективности здания, класса энергоэффективности, основные инженерные системы жилого дома, показатели влияния на состояние системы, инженерная составляющая и пути ее совершенствования. Рассмотрены вопросы, касающиеся проведения полного анализа существующих систем с целью оценки внедрения необходимых мер по энергосбережению, риски и преимущества приведенных мероприятий. Определены возможности контроля энергопотребления, эффективности проводимой работы вследствие реконструкции инженерных систем дома. Проведены результаты анализа энергоэффективных мероприятий, целесообразности внедрения каждого из них с целью выявления оптимальных решений. **Вывод.** Повышение уровня энергоэффективности инженерных систем здания является одной из приоритетных задач для создания комфортных условий проживания. Класс энергоэффективности инженерных зданий устанавливается согласно состоянию системы, учитывает все показатели качества по потреблению энергии, а энергетический сертификат в полном объеме показывает уровень энергоэффективности.

Ключевые слова: энергоэффективность, класс энергоэффективности, жилой дом, инженерные системы, анализ, энергоэффективные мероприятия, контроль энергопотребления, реконструкция инженерной составляющей, оценка мероприятий

MEASURES TO IMPROVE ENERGY EFFICIENCY OF BUILDING UTILITY SYSTEMS

A. S. Gavrilov, A.E. Sergeev

Kazan State Power Engineering University,
51 Krasnoselskaya Str., Kazan 420066, Russia

Abstract. Objective. The goal of the study is to identify ways to improve energy efficiency by conducting a comprehensive analysis of engineering systems of a house, taking into account the existing model of energy supply and by monitoring the indicators of influence on the efficiency of engineering and technical equipment. **Methods.** The main method is based on a survey of the level of energy efficiency of heating and hot water supply systems. **Results.** The article discusses the concept of energy efficiency of a building, energy efficiency class, main utility systems of a residential building, indicators of influence on the state of systems, engineering component and ways to improve it. The article addresses issues related to a full analysis of existing systems in order to assess the implementation of

*necessary energy-saving measures, as well as their risks and benefits. The possibilities of controlling energy consumption and efficiency of works carried out due to the reconstruction of utility systems of the building have been determined. The results of the analysis of energy-efficient measures, and the feasibility of implementing each of them have been determined in order to identify optimal solutions. **Conclusion.** Increasing the energy efficiency of building utility systems is one of the priority tasks for creating comfortable living conditions. The energy efficiency class of building utility systems is established according to the state of a system, takes into account all quality indicators for energy consumption, and the energy certificate fully shows the level of energy efficiency.*

Keywords: *energy efficiency, energy efficiency class, residential building, utility systems, analysis, energy efficiency measures, energy consumption control, reconstruction of engineering component, assessment of measures*

Введение. Вопрос энергоэффективности в России всегда был актуальным. На основе доклада Минэкономразвития по итогам 2019 года уровень энергоемкости ВВП в России составил рекордно низкое значение за период последних пяти лет (9,62 т.у.т./млн руб. в ценах 2016 года). Валовое потребление топливно-энергетических ресурсов по сравнению с аналогичным показателем прошлого года снизилось на 6,6 млн. т.у.т. при росте ВВП Российской Федерации на 1,3%. Практически во всех ключевых секторах потребления энергоресурсов удалось достичь положительной динамики в области энергоэффективности, в большей мере – за счет повышения технологичности производства [1]. Однако, несмотря на положительную динамику энергоемкости, темпы повышения энергоэффективности экономики в России отстают от среднемировых показателей. Основной проблемой создавшегося положения является необходимость полного переоснащения инженерных систем здания, их модернизация, а иногда полная реконструкция. Принимая во внимания конкретно жилой сектор, имеется в виду создание комфортных условий проживания и определения экономически целесообразного уровня энергоэффективности.

Постановка задачи. Целью исследования является определение путей повышения уровня энергоэффективности за счет проведения комплексного анализа инженерных систем дома с учетом существующей модели энергообеспечения и контроля показателей влияния на эффективность работы инженерно-технического оборудования.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

- исследование существующего состояния инженерного оснащения здания;
- выявление необходимых соотношений «цена-качество», «долговечность/ практичность» в проекте инженерных характеристик;
- усовершенствование инженерных составляющих дома на основе внедрения нового технологического базиса, применяемых в данной сфере;
- разработка рекомендаций по повышению уровня энергоэффективности в будущем на основе проведенных мероприятий проверки и переоснащение инженерных систем.

Энергетическая эффективность дома это, прежде всего, характеристики, отражающие отношение полезного эффекта от использования энергетических ресурсов к затратам энергетических ресурсов, произведенным в целях получения такого эффекта, применительно к продукции, технологическому процессу, юридическому лицу, индивидуальному предпринимателю [2, 13-15]. Повышение качества показателей потребления этих энергетических ресурсов и является основной задачей мероприятий по энергосбережению.

Методы исследования. Основная методика базируется на обследовании инженерных систем отопления и горячего водоснабжения, проводится с учетом положений действующего законодательства страны. Методика определяет: уровни энергетической эффективности систем; общие требования к порядку проведения обследования инженерных систем; порядок про-

ведения обследования систем отопления здания; порядок проведения обследования систем горячего водоснабжения; порядок проведения обследования систем вентиляции и кондиционирования; порядок проведения обследования систем освещения здания или его части; порядок разработки рекомендаций по обеспечению (повышения уровня) энергетической эффективности инженерных систем; форму и требования к оформлению отчета о результатах обследования инженерных систем [3].

Класс энергоэффективности базируется на основе существующих инженерных составляющих дома и определяется по показателю общего удельного энергопотребления при отоплении, охлаждении и поставке горячей воды (EP). В табл. 1 приведены семь уровней, согласно которым и устанавливается класс энергоэффективности жилого здания.

Таблица 1. Классификация жилых зданий по энергетической эффективности
Table 1. Classification of residential buildings by energy efficiency

Количество этажей Number of floors	Значение общих показателей удельного энергопотребления при отоплении, охлаждении и поставке горячей воды (EP), кВт × ч/м ² , для класса энергетической эффективности жилых зданий. The value of the total specific energy consumption for heating, cooling and hot water supply (EP), kWh / m ² , for the energy efficiency class of residential buildings.						
	A	B	C	D	E	F	G
1-3	<66	<119	<132	<165	<198	≤231	>231
4 и больше	<44	<79	<87	<109	<131	≤153	>153

Энергетический сертификат, как электронный документ, создается на основе полученных показателей и класса энергоэффективности в установленном законодательством порядке [4].

Мероприятия по повышению энергоэффективности жилых зданий могут быть реализованы по двум направлениям: во-первых, оснащение дома энергосберегающим инженерным оборудованием, системами и элементами, которые обеспечивают возможность экономного использования топливно-энергетических ресурсов; во-вторых, эксплуатация жилых зданий и инженерного оборудования с целью достижения высоких показателей энергоэффективности, регулирования энергопотребления, энергомониторинга.

Данные, которые берутся за основу, включают: контроль качества и учета объемов потребления теплоты и других энергоресурсов, потребляемых для обеспечения теплового комфорта в доме; сбор и постоянный анализ данных о расходах теплоносителя, тепловой энергии, а также температуры в подающем и обратном трубопроводах тепловой сети в соответствии с показаниями приборов в домовом узле учета тепловой энергии; выявление причин перерасхода тепловой энергии и внедрение мероприятий по уменьшению потребления теплоты; регулирования процессов использования энергоресурсов; организация технического обслуживания систем автоматического регулирования параметров и объемов энергоресурсов, своевременное выполнение планово-профилактических работ, гидравлического испытания и промывания систем отопления и горячего водоснабжения; проверки чистоты и герметичности вентиляционных каналов; составление инструкций по эксплуатации систем отопления, горячего водоснабжения и вентиляции дома, требований таких инструкций; контроль за параметрами микроклимата в помещениях здания; снижение нерациональных расходов энергоресурсов, использование функции уменьшения отпуска тепловой энергии в автоматических системах регулирования. [5,6] Детальное описание приведено в перечне энергосберегающих мероприятий для каждой системы отдельно в табл.2. [5,6]

Таблица 2. Перечень энергосберегающих мероприятий, которые можно внедрять в жилых домах
Table 2. List of energy saving measures that can be implemented in residential buildings

Мероприятия по экономии тепловой энергии на нужды горячего водоснабжения Measures to save heat energy for the needs of hot water supply	Срок окупаемости, года Payback period, years
Установка пластинчатых или других высокоэффективных теплообменников для приготовления горячей воды в ИТП. Installation of plate or other highly efficient heat exchangers for preparing hot water in ITP	5 ... 7
Автоматическое регулирование температуры горячей воды в системах горячего водоснабжения Automatic regulation of hot water temperature in hot water supply systems	3 ... 5
Использование водосберегающих аэрируемых (распылительных) душевых насадок и насадок на разборных кранах системы горячего водоснабжения. Use of water-saving aerated (spray) shower heads and nozzles on hot water taps	1
Использование водосберегающих и термостатических смесителей. Use of water-saving and thermostatic mixers	1
Внедрение автоматических систем управления временем подачи горячей воды. Управление продолжительностью работы насосов горячего водоснабжения Implementation of automatic control systems for hot water supply time. Hot water pump running time control	2
Оптимизация схемы приготовления горячей воды в ИТП или ЦТП. Optimization of the hot water preparation scheme in ITP or CHP	3 ... 5
Использование геотермодатчиков для приготовления горячей воды в летний период The use of geo-collectors for preparing hot water in the summer	
Мероприятия по экономии тепловой энергии на нужды системы отопления и вентиляции Measures to save heat energy for the needs of the heating and ventilation system	
Балансировка вентиляционных каналов, установка регулируемых вентиляционных решеток и регуляторов потока воздуха Balancing ventilation ducts, installation of adjustable ventilation grilles and air flow regulators	1 ... 2
Внедрение автоматических систем регулирования отпуска теплоты. Устройство автоматических тепловых узлов ввода с возможностью погодного и пофасадного регулирования, уменьшения температуры внутреннего воздуха в выходные дни и ночное время суток. Introduction of automatic heat supply control systems. Arrangement of automatic heating input units with the possibility of weather and frontal control, reducing the temperature of the internal air on weekends and at night	4
Установление многоскоростных электроприводов циркуляционных и сетевых насосов или приводов насосов с электронным частотным регулированием числа оборотов в ЦТП и ИТП. Installation of multi-speed electric drives for circulating and network pumps or pump drives with electronic frequency control of the number of revolutions in the central heating station and ITP	5
Реконструкция систем отопления с целью обеспечения гидравлической и тепловой устойчивости систем и возможности индивидуального регулирования отпуска теплоты каждым нагревательным прибором и индивидуализации расчетов за потребленную теплоту (переход на двухтрубные горизонтальные системы отопления, установка термостатических клапанов, установление закрытых расширительных баков). Reconstruction of heating systems in order to ensure the hydraulic and thermal stability of the systems and the possibility of individual regulation of heat release by each heating device and individualization of payments for consumed heat (transition to two-pipe horizontal heating systems, installation of thermostatic valves, installation of closed expansion tanks)	5
Внедрение аккумуляционных систем отопления. Introduction of storage heating systems	5 ... 7
Оборудование системы отопления устройствами автоматического регулирования с учетом температуры наружного воздуха. Equipping the heating system with automatic control devices taking into account the outdoor temperature	5 ... 7
Установление утилизаторов теплоты вытяжного вентиляционного воздуха в механических системах вентиляции. Installation of heat recovery units for exhaust ventilation air in mechanical ventilation systems	12
Реконструкция системы отопления на однотрубную с замыкающими участками или двухтрубную с последующим установлением термостатических клапанов на отопительных приборах. Reconstruction of the heating system to one-pipe with closing sections or two-pipe with the subsequent installation of thermostatic valves on heating devices	5 ... 7
Реконструкция индивидуальных тепловых пунктов с целью оптимизации схемы подключения теплообменников горячего водоснабжения, автоматического регулирования температуры горячей воды, установление регуляторов расхода воды на нужды отопления. Reconstruction of individual heating points in order to optimize the connection diagram of hot water supply heat exchangers, automatic control of hot water temperature, installation of water flow controllers for heating needs.	5

Обсуждение результатов. При планировании мероприятий по энергосбережению в многоквартирном доме необходимо осуществить проверку соответствия конструкции инженерных систем отопления. Очень важны технические аспекты проведения капитального ремонта вентиляции, горячего и холодного водоснабжения проектным данным. Несанкционированное вмешательство жителей в работу таких систем может привести к негативным последстви-

ям, что любые инженерные методы налаживания или регулирования работы систем могут не давать эффекта. Наиболее распространенными несанкционированными вмешательствами в инженерные системы являются:

- подключение дополнительных нагревательных приборов, в том числе на балконах и лоджиях, увеличение поверхности нагрева существующих приборов;
- декорирование отопительных приборов;
- устройство «теплого пола»;
- изменение трассировки трубопроводов системы отопления;
- подключение регистров для просушки полотенец в ванных комнатах к системе отопления;
- ликвидация переключающего трубопровода возле отопительных приборов в одноконтурных системах отопления;
- подключение зонтов с вентиляторным удалением воздуха в вытяжных воздуховодах гравитационных вытяжных систем вентиляции;
- индивидуальные подключения отопительных приборов к коллекторам системы отопления в подвалах или технических этажах. [5]

На примере моделирования и реконструкции индивидуального теплопункта (ИТП) можно проследить важность подобных мероприятий, а также объем работы, который должен быть выполнен в процессе.

Автоматизация процесса отпуска теплоты в здание в индивидуальном тепловом пункте (ИТП) дает возможность оперативно реагировать на изменение потребности дома в теплоте на отопление, что обусловлено значительной динамикой теплопоступлений в доме от людей, освещения, оборудования и солнечной инсоляции.

Выбираем независимую схему подключения. Ее недостатком является высокая цена оборудования, что входит в состав модели, но возможности контроля давления в обратном трубопроводе, подключение к домам в 12 этажей и выше, повышенная устойчивость оборудования в условиях эксплуатации дают большое преимущество над рисками. Эффективность энергосбережения в случае установления такой системы подключения будет на уровне 10-40%.

Схема подогрева избирается из двухступенчатым присоединением подогреваемого оборудования ГВС. Ее главная особенность заключается в том, что подключение подогревателей горячей воды верхней степени к подающему трубопроводу происходит параллельно системе отопления. Далее проводим расчет параметров диаметра подогреваемого трубопровода на входе и выходе; диаметра трубопровода на систему отопления; диаметра трубопровода на подпитку. Выбираем насос:

1. Для ГВС – насос с мокрым ротором типа Wilo-P 50/250r.
2. Для отопления – насос с мокрым ротором типа Wilo-P 50/250r с фланцевым соединением.
3. Для подпитки высокоэффективный насос типа WILO-Multivert MVI-200.
4. Расширительный бак (мембранный), подбираем объем, трубы, радиаторы.

Теплообменник. В тепловых пунктах следует применять водяные горизонтальные секционные кожухотрубные или пластинчатые теплообменники или паровые горизонтальные многоходовые теплообменники.

Каждый пароводяной подогреватель должен быть оборудован конденсатообразным оборудованием или регулятором перелива для отвода конденсата, штуцерами с запорной арматурой для выпуска воздуха, спуска воды и предохранительным клапаном, которые предусматриваются в соответствии с требованиями, водонагреватели должны быть оборудованы предохранительными клапанами, устанавливаемыми со стороны нагреваемой среды, а также воздушными и спускными устройствами. [6,7, 13]

Автоматизация теплового пункта включает в себя следующие особенности контроля:

- поддержка заданной температуры воды, поступающей в систему горячего водоснабжения;
- регулирование подачи теплоты (теплового потока) в системы отопления в зависимости от изменения параметров наружного воздуха с целью поддержания заданной температуры воздуха в помещениях;
- ограничение максимального расхода воды из тепловой сети на тепловой пункт путем прикрытия клапана регулятора расхода теплоты на отопление закрытых систем теплоснабжения;
- защита систем потребления теплоты от повышения давления или температуры воды в трубопроводах этих систем при возможности превышения допустимых параметров;
- поддержание заданного давления воды в системе горячего водоснабжения;
- включение и исключения корректирующих насосов;
- блокировка включения резервного насоса при отключении рабочего;
- защита системы отопления от неконтролируемого слива;
- прекращение подачи воды в бак-аккумулятор или в расширительный бак при независимом присоединении систем отопления по достижении верхнего уровня в баке и включение подпиточных устройств при достижении нижнего уровня [7,12].

В тепловых пунктах с расходом теплоты более 2,3 МВт, как правило, должны предусматриваться следующие контрольно-измерительные приборы:

а) манометры самопишущие – после запорной арматуры на вводе в тепловой пункт выхода и обратного трубопроводов водяных тепловых сетей, паропроводов и конденсатопроводов;

б) манометры показывают:

- до запорной арматуры на вводе в тепловой пункт трубопроводов водяных тепловых сетей, паропроводов и конденсатопроводов;
- на распределительном и сборном коллекторах водяных тепловых сетей и паропроводов;
- после узла смешения;
- на паропроводах до и после редуцирующих клапанов;
- на трубопроводах водяных тепловых сетей и паропроводов до и после регуляторов давления.

Итак, процесс реконструкции тёплого пункта – сложный и, учитывая цену на оборудование, срок окупаемости будет значительным, но не более 5 лет с учетом возможной экономии [7-11].

Вывод. Повышение уровня энергоэффективности инженерных систем здания является одной из приоритетных задач для создания комфортных условий проживания. И экономия энергии на уровне до 40% возможна только после проведения полного анализа всех составляющих.

Класс энергоэффективности устанавливается согласно состоянию системы, он учитывает все показатели качества по потреблению энергии, а энергетический сертификат в полном объеме показывает уровень энергоэффективности дома до и после проведения работ. На примере ИТП были рассмотрены конструктивные особенности модернизации системы для повышения энергоэффективности. Несмотря на достаточно высокую стоимость оборудования, если принимать во внимание повышение энергоэффективности здания, экономия от проведенных работ на достаточном уровне, чтобы считать целесообразным проведение подобного мероприятия.

Библиографический список:

1. Государственный доклад Минэкономразвития РФ «О состоянии энергосбережения и повышении энергетической эффективности в Российской Федерации». М., 2020. 117с // URL:

https://www.economy.gov.ru/material/file/c3901dba442f8e361d68bc019d7ee_83f/Energyefficiency2020.pdf (дата обращения: 12.02.2021).

2. Федеральный закон «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» от 23.11.2009 № 261-ФЗ (последняя редакция) // СПС «КонсультантПлюс». URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_93978/ (дата обращения: 12.02.2021).
3. Приказ Министерства регионального развития РФ от 8 апреля 2011 года № 161 «Об утверждении Правил определения классов энергетической эффективности многоквартирных домов и Требований к указателю класса энергетической эффективности многоквартирного дома, размещаемому на фасаде многоквартирного дома». URL: <http://docs.cntd.ru/document/420369798> (дата обращения: 12.02.2021).
4. Наумов А.Л., Капко Д.В. Определение класса энергетической эффективности эксплуатируемых многоквартирных домов // Энергосбережение. №8. 2015. URL: https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=6291 (дата обращения: 12.02.2021).
5. Васильев Г.П., Наумов А.Л., Евстратова Н.Д. Повышение энергоэффективности инженерного оборудования зданий. Стимулы и барьеры // Энергосбережение. №2. 2012. URL: https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=5187 (дата обращения: 12.02.2021).
6. Колубков А.Н., Шилкин Н.В. Реализация энергосберегающих мероприятий в инженерных системах многоквартирных жилых домов // АВОК. №7. 2011. URL: https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=5050 (дата обращения: 12.02.2021).
7. Витальев В.П., Николаев В.Б., Порывай Г.А., Сельдин Н.Н. Эксплуатация тепловых пунктов систем теплоснабжения: справочник. М.: Стройиздат, 1985. 382 с.
8. Ensuring energy efficiency of buildings through technology https://www.tesli.com/upload/iblock/b21/abb_i_bus_knx_energy_efficiency.
9. G. J. Delport and I. E. Lane, "electricity cost management in mining", power engineering journal, 1996, Centre for New Electricity Studies, Department of Electrical and Electronic Engineering, University of Pretoria, Pretoria 0002, South Africa. E-mail: johan.delport@ee.up.ac.za
10. Schiler, Simplified Design of Building Lighting, John Wiley & Sons, New York, USA, 1992.
11. Noor M. Maricar and Md. Noah Jamal "Industrial Energy Audit using Data Mining Model Web Application" email: nmaricar@vt.edu
12. Дмитриев А.Н. Энергосбережение в реконструируемых зданиях, DJVU / А.Н. Дмитриев, П.В. Монастырев, С.Б. Сборщиков. - Москва : АСВ, 2008.-208 с.
13. Заводчиков Н.Д. Управление эффективностью использования энергоресурсов в растениеводстве: монография / Н.Д. Заводчиков, Е.А. Воронкова. - Оренбург: Издательский центр ОГАУ, 2012. 172 с.
14. Зенютич Е.А. Экономия энергии в образовательных учреждениях. Технологии энергосбережения и финансовые механизмы / Е.А. Зенютич, В.Н. Котомкин, Е.Б. Солнцев, и др. ; под общ. ред. С.К. Сергеева. Москва, 2006. 266 с.
15. U.S. Department of Energy. Energy Savings Potential of Solid- State Lighting in General Illumination Applications. - Режим доступа : http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/ssl_energy-savings-report-jan-2012.pdf (дата обращения 13.08.2020).

References:

1. Gosudarstvennyy doklad Minekonomrazvitiya RF «O sostoyanii energosberezheniya i povyshenii energeticheskoy effektivnosti v Rossiyskoy Federatsii». [State report of the Ministry of Economic Development of the Russian Federation "On the state of energy conservation and energy efficiency in the Russian Federation." M., 2020.117s//Official website of the Ministry of Economic Development of the Russian Federation.URL: https://www.economy.gov.ru/material/file/c3901dba442f8e361d68bc019d7ee_83f/Energyefficiency2020.pdf (date accessed: 12.02.2021). (In Russ)]
2. Federal'nyy zakon «Ob energosberezhenii i o povyshenii energeticheskoy effektivnosti i o vnesenii izmeneniy v otdel'nyye zakonodatel'nyye akty Rossiyskoy Federatsii» ot 23.11.2009 № 261-FZ (poslednyaya redaktsiya) [Federal Law "On Energy Saving and on Increasing Energy Efficiency and on Amending Certain Legislative Acts of the Russian Federation" dated 23.11.2009 No. 261-FZ (last edition) // SPS "ConsultantPlus". URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_93978/ (date of access: 12.02.2021). (In Russ)]
3. Prikaz Ministerstva regional'nogo razvitiya RF ot 8 aprelya 2011 goda № 161 «Ob utverzhdenii Pravil opredeleniya klassov energeticheskoy effektivnosti mnogokvartirnykh domov i Trebovaniy k ukazatelyu klassa energeticheskoy effektivnosti mnogokvartirnogo doma, razmeshchayemomu na fasade mnogokvartirnogo doma». [Order of the Ministry of Regional Development of the Russian Federation of April 8, 2011 No. 161 "On Approval of the Rules for Determining Energy Efficiency Classes of Apartment Buildings and Requirements for the Energy Efficiency Class Index of an Apartment Building Placed on the Facade of an Apartment Building". URL: <http://docs.cntd.ru/document/420369798> (date of access: 12.02.2021). (In Russ)]
4. Naumov A.L., Kapko D.V. Opredeleniye klassa energeticheskoy effektivnosti ekspluatiruyemykh mnogokvartirnykh domov // Energoberezheniye. №8. 2015. [Naumov A.L., Kapko D.V. Determination of the energy effi-

- ciency class of operated apartment buildings // Energoberezhenie. No. 8. 2015. URL: https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=6291 (date of access: 12.02.2021). (In Russ)]
5. Vasil'yev G.P., Naumov A.L., Yevstratova N.D. Povysheniye energoeffektivnosti inzhenernogo oborudovaniya zdaniy. Stimuly i bar'yery // Energoberezheniye. №2. 2012. [Vasiliev G.P., Naumov A.L., Evstratova N.D. Improving the energy efficiency of engineering equipment in buildings. Incentives and barriers // Energy saving. No. 2. 2012. URL: https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=5187 (date accessed: 12.02.2021). (In Russ)]
 6. Kolubkov A.N., Shilkin N.V. Realizatsiya energosberegayushchikh meropriyatiy v inzhenernykh sistemakh mnogokvartirnykh zhilykh domov // AVOK. №7. 2011. [Kolubkov A.N., Shilkin N.V. Implementation of energy-saving measures in engineering systems of multi-apartment residential buildings // AVOK. No. 7. 2011. URL: https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=5050 (date of access: 12.02.2021). (In Russ)]
 7. Vital'yev V.P., Nikolayev V.B., Poryvay G.A., Sel'din N.N. Ekspluatatsiya teplovykh punktov sistem teplosnabzheniya: spravochnik. M.: Stroyizdat, 1985. 382 s. [Vitaliev V.P., Nikolaev V.B., Poryvai G.A., Seldin N.N. Operation of heat points of heat supply systems: a reference book. Moscow: Stroyizdat, 1985.382 p. (In Russ)]
 8. Ensuring energy efficiency of buildings through technology [Ensuring energy efficiency of buildings through technology https://www.tesli.com/upload/iblock/b21/abb_i_bus_knx_energy_efficiency. (In Russ)]
 9. G. J. Delpont and I. E. Lane, "electricity cost management in mining", power engineering journal, 1996, Center for New Electricity Studies, Department of Electrical and Electronic Engineering, University of Pretoria, Pretoria 0002, South Africa. E-mail: johan.delpont@ee.up.ac.za
 10. Schiler, Simplified Design of Building Lighting, John Wiley & Sons, New York, USA, 1992.
 11. Noor M. Maricar and Md. Noah Jamal "Industrial Energy Audit using Data Mining Model Web Application" email: nmaricar@vt.edu
 12. Dmitriyev A.N. Energoberezheniye v rekonstruiyemykh zdaniyakh, DJVU / A.N. Dmitriyev, P.V. Monastyrev, S.B. Sborshchikov. Moskva: ASV, 2008. 208 s. [Dmitriyev A.N. Energy saving in reconstructed buildings, DJVU / A.N. Dmitriyev, P.V. Monastyrev, S. B. Collectors. - Moscow: ASV, 2008. 208 p. (In Russ)]
 13. Zavodchikov N.D. Upravleniye effektivnost'yu ispol'zovaniya energoresursov v rasteniyevodstve: monografiya / N.D. Zavodchikov, Ye.A. Voronkova. - Orenburg: Izdatel'skiy tsentr OGAU, 2012. 172 s. [Breeders N.D. Energy efficiency management in crop production: monograph / N.D. Breeders, E.A. Voronkov. - Orenburg: Publishing Center OGAU, 2012.172 p. (In Russ)]
 14. Zenyutich Ye.A. Ekonomiya energii v obrazovatel'nykh uchrezhdeniyakh. Tekhnologii energosberezheniya i finansovyye mekhanizmy / Ye.A. Zenyutich, V.N. Kotomkin, Ye.B. Solntsev, i dr. ; pod obshch. red. S.K. Sergeeva. - Moskva, 2006. 266 s. [Zenyutich E.A. Energy saving in educational institutions. Energy saving technologies and financial mechanisms / E.A. Zenyutich, V.N. Kotomkin, E.B. Solntsev, and others; under total. ed. S.K. Sergeeva. - Moscow, 2006. 266 p. (In Russ)]
 15. U.S. Department of Energy. Energy Savings Potential of Solid- State Lighting in General Illumination Applications. - Access mode: http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/ssl_energy-savings-reportjan-2012.pdf (date of access 13.08.2020).

Сведения об авторах:

Гаврилов Артём Степанович, кандидат технических наук, доцент, кафедра «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения»; artemchik@mail.ru

Сергеев Александр Евгеньевич, магистрант; sergeev_sashka@inbox.ru

Information about the authors:

Artem S. Gavrilov, Cand. Sci. (Technical), Assoc. Prof., Department of Industrial Heat Power Engineering and Heat Supply Systems; artemchik@mail.ru

Aleksandr E. Sergeev, Undergraduate; sergeev_sashka@inbox.ru

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 20.04.2021.

Принята в печать 15.05.2021.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 20.04.2021.

Accepted for publication 15.05.2021.

Для цитирования: С.С. Добросмыслов, Н.Н. Рожкова, А.Ф. Рожков, М.А. Перькова, С.А. Алиев. Влияние воздушной прослойки на температурно-влажностные характеристики наружной ограждающей конструкции при внутреннем утеплении. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2021;48(2):81-91. DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-2-81-91

For citation: S.S. Dobrosmyslov, N.N. Rozhkova, A.F. Rozhkov, M.A. Perkova, S.A. Aliev. Influence of air layer on temperature and humidity characteristics of outer envelope structure with internal heat insulation. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2021; 48(2):81-91. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-2-81-91

**СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
BUILDING AND ARCHITECTURE**

УДК 697.147

DOI: 10.21822/2073-6185-2021-48-2-81-91

**ВЛИЯНИЕ ВОЗДУШНОЙ ПРОСЛОЙКИ НА ТЕМПЕРАТУРНО-ВЛАЖНОСТНЫЕ
ХАРАКТЕРИСТИКИ НАРУЖНОЙ ОГРАЖДАЮЩЕЙ КОНСТРУКЦИИ
ПРИ ВНУТРЕННЕМ УТЕПЛЕНИИ**

^{1,2}, Добросмыслов С.С.,¹Рожкова Н.Н.,¹Рожков А.Ф.,¹Перькова М.А.,¹Алиев С.А.

¹Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук,
¹660036, г. Красноярск, ул. Академгородок, д. 50, Россия,

²Сибирский федеральный университет,
²660041, Красноярский край, г. Красноярск, пр. Свободный, 79, Россия

Резюме. Цель. В статье рассмотрен процесс тепло- и массообмена в наружной ограждающей конструкции при внутреннем утеплении. Для предотвращения выпадения конденсата предлагается использовать вентилируемый воздушный канал внутри стеновой конструкции. **Метод.** Исследование проводилось методами численного моделирования. Движение воздуха в канале описывалось решением уравнения Навье-Стокса в $k-\epsilon$ приближении. Выпадение конденсата рассматривалось в рамках совместного решения уравнений теплопроводности и диффузии. Решение задачи тепло и массообмена осуществлялось для конструкции при наличии внутреннего утепления; за слоем внутреннего утеплителя размещалась воздушный канал, в котором происходит движение воздуха при естественной или вынужденной конвекции. **Результат.** В рамках работы было показано, что использование воздушного канала существенно снижает тепловое сопротивление конструкции, причем повышение скорости воздушного потока приводит к уменьшению теплового сопротивления и снижению вероятности выпадения конденсата. Снижение теплового сопротивления при увеличении скорости воздушного потока в прослойки происходит быстрее, чем увеличение количества уносимой влаги. **Вывод.** По результатам работы установлено, что использование воздушного канала на протяжении всего периода эксплуатации здания не эффективно, а предлагается использовать данный канал периодический в зимний период времени для сушки выпавшего конденсата.

Ключевые слова: влажность, теплообмен, внутреннее утепление, численное моделирование, тепловое сопротивление, конденсат

**INFLUENCE OF AIR LAYER ON TEMPERATURE AND HUMIDITY CHARACTERISTICS
OF OUTER ENVELOPE STRUCTURE WITH INTERNAL HEAT INSULATION**

^{1,2}S.S. Dobrosmyslov,¹N.N. Rozhkova,¹A.F. Rozhkov,¹M.A. Perkova,¹S.A. Aliev

¹Krasnoyarsk Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
¹50 Akademgorodok St., Krasnoyarsk 660036, Russia,

²Siberian Federal University,
²79 Svobodny Ave., Krasnoyarsk Region, Krasnoyarsk 660041, Russia

Abstract. Objective. The article addresses the process of heat and mass transfer in outer envelope structure with internal heat insulation. To prevent condensate formation, it is proposed to use a ventilated air duct inside the wall structure. **Methods.** The study was carried out using numerical simulation methods. Air movement in the duct was described by solving the Navier-Stokes equation in $k-\epsilon$

approximation. Condensate formation was analysed via joint resolution of heat conduction and diffusion equations. The problem of heat and mass transfer was addressed for a structure with internal heat insulation, behind the layer of which an air duct was located with air movement occurring due to natural or forced convection. **Results.** As part of the work, it was shown that the use of an air duct significantly reduces the thermal resistance of the structure, and an increase in the airflow rate leads to a decrease in thermal resistance and the likelihood of condensate formation. A decrease in thermal resistance with an increase in air flow rate into interlayers occurs faster than an increase in the amount of air-entrained moisture. **Conclusion.** Results of the work have shown that the use of an air duct throughout the entire period of operation of a building is not effective, but it is proposed to use this duct periodically in winter to dry the condensate.

Keywords: humidity, heat and mass transfer, internal heat insulation, numerical simulation, thermal resistance, condensate

Введение. На сегодняшний день значительная часть эксплуатируемых зданий не удовлетворяет требованиям по теплозащите (СП 50.13330.2012.Тепловая защита зданий: актуализированная версия – взамен СНиП 23-02-2003) вследствие того, что были возведены по нормативным требованиям СНиП II-3-79, где величина требуемого теплового сопротивления составила $1 \text{ м}^2\text{С/Вт}$, в отличие от $3,6 \text{ м}^2\text{С/Вт}$, согласно современной проектной документации. Следовательно, при выполнении работ по реконструкции необходимо повышать энергоэффективность объектов [1]. Повышение энергоэффективности позволит существенно сократить затраты на отопление [1-4].

Однако в ряде случаев фасад таких зданий является объектом культурного наследия, что накладывает условия невозможности внешнего утепления [2], а утепление изнутри оказывается в таком случае единственным техническим решением, удовлетворяющим все вышеперечисленные требования. При этом не исключено смещение плоскости возможной конденсации в слоях внутреннего утепления [5], и как следствие возможного повышения вероятности выпадения конденсата, особенно в период с экстремальными температурами [7-9].

Основным фактором, влияющим на температурно-влажностный режим помещения, является климат местности [10-12]. Сохранение удовлетворительного тепло-влажностного режима в помещении и предотвращение выпадения конденсата является важной технической задачей [13], на решение которой направлено большое количество научных исследований [14-21], чтобы повысить энергоэффективность и долговечность наружных ограждающих конструкций. Экспериментальное исследование требует значительных капитальных вложений и не всегда целесообразно. Следовательно, наиболее оптимальный метод решения поставленной задачи это численное моделирование.

Постановка задачи. Предложим следующее техническое решение: при приведении зданий к требованиям ФЗ было проведено утепление конструкции изнутри. Для сушки данного утеплителя в конструкции стены расположен вентилируемый канал. Численное моделирование позволит оптимизировать режим функционирования ограждающей конструкции. Оценка эффективности использования данной конструкции может быть определена путем решения задачи тепломассообмена, включающая совместное решения уравнений теплопроводности и Навье-Стокса. Наличие уравнения Навье-Стокса практически всегда усложняет математическую модель и для упрощения математической задачи целесообразно использовать различные упрощения, наиболее простым из которых является модель турбулентности к-ε.

Основным параметром, влияющим на процесс тепломассообмена в данных условиях, является скорость воздушного потока в канале с обязательным введением воздушного зазора между основной конструкцией и утеплителем. При этом циркуляция воздуха в канале может осуществляться как в процессе естественной конвекции из-за разницы температур, так и в процессе вынужденной конвекции при наличии специальных устройств, рассмотрение которых выходит за рамки поставленной задачи.

В тоже время, варьируя скорость воздушного потока, можно управлять тепломассообменом, меняя тепловое сопротивление и скорость выпадения конденсата. Интенсивность выпадения конденсата определяется внешней температурой, чем она ниже, тем интенсивность выше. Соответственно, рассматриваемую задачу целесообразно решать в экстремальных погодных условиях, согласно СП 131.13330.2018 Строительная климатология: актуализированная версия СНиП 23-01-99 - «это температура наиболее холодной пятидневки».

Целью данной работы является исследование режима функционирования наружной ограждающей конструкции при наличии внутреннего утепления для оптимизации режима работы вентиляционного канала.

Методы исследования. В ранее выполненных исследованиях была предложена физико-математическая модель, описывающая тепло-влажноперенос [7]. Однако при рассмотрении задачи тепло и массообмена в вентилируемом канале предложенную модель необходимо дополнить. Соответственно, при решении поставленной задачи можно воспользоваться следующей системой уравнений (1):

$$\begin{cases} \left(\frac{\partial}{\partial x} \lambda \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \rho C_p (\vec{u} \nabla T) = 0 \\ \left(\frac{\partial}{\partial x} \mu \frac{\partial e}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \mu \frac{\partial e}{\partial y} \right) + (\vec{u} \nabla e) = 0 \\ E = 1,84 \times 10^{11} \exp \left(\frac{-5330}{T} \right) \\ \varphi = \frac{e}{E} 100\% \end{cases} \quad (1)$$

где λ - коэффициент теплопроводности, Вт/(м град); T - температура, К; μ - коэффициент паропроницаемости, кг/(с·м·Па); E - давление насыщенного водяного пара, Па; φ - относительная влажность, %; e - парциальное давление водяного пара, Па, $\vec{u}$ - вектор скорости, м/с.

В реальности, влажности воздуха не может быть больше чем 100 %, однако для оценки потенциальной возможности ограждающей конструкции введем величину, определенную следующим образом:

$$\text{если } \varphi > 1; I = \frac{1}{S_0} \iint \varphi \, dS \quad (2)$$

где S_0 - площадь расчетной области, м².

Данная величина характеризует интегральную вероятность выпадения конденсата в конструкции в процессе ее эксплуатации.

$$\begin{aligned} p(u \nabla u) &= \nabla [-pI + (\eta + \eta_T)(\nabla u + (\nabla u)^T)] + F \\ \nabla u &= 0 \\ pu \nabla k &= \nabla [\eta + (\eta_T / \sigma_T) \nabla k] + \eta_T P(u) - p\varepsilon \\ pu \nabla \varepsilon &= \nabla [(\eta + \eta_T / \sigma_\varepsilon) \nabla \varepsilon] + \frac{C_{\varepsilon 1} \varepsilon \eta_T P(u)}{k} - \frac{C_{\varepsilon 2} p \varepsilon^2}{k} \\ P(u) &= \frac{\nabla u}{(\nabla u + (\nabla u)^T)}; \eta_T = p C_\mu k^2 / \varepsilon \end{aligned} \quad (3)$$

где p - давление, Па; η - динамическая вязкость, Па·с; F - поле внешних сил, Н/м³; k - кинетическая энергия объема, Дж/м³; C, σ - коэффициент учитывающий диффузию энергии.

Обсуждение результатов. В исследовании был рассмотрен конструкционно-теплоизоляционный блок - керамзитобетон на кварцевом песке, воздушный зазор, плиты минераловатные из каменного волокна, верхняя и нижняя решетка АМН-К 300x150, многослойные плиты перекрытия. Геометрические размеры расчетной области представлены на рис. 1.

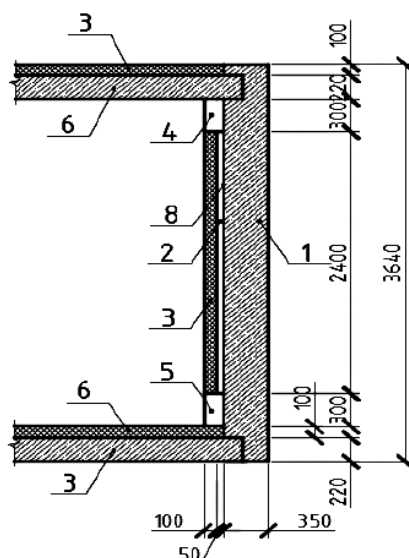


Рис. 1. Расчетная схема конструкции

1 – керамзитобетон, 2 – воздушный зазор, 3 – плиты минераловатные из каменного волокна, 4 – верхняя решетка АМН-К 300х150, 5 – нижняя решетка АМН-К 300х150, 6 – многпустотные плит перекрытия, 7 – воздушный канал, 8 – штукатурный слой (цементно-песчаный раствор)

Fig. 1. Design scheme of the structure

1-expanded clay concrete, 2 – air gap, 3 – mineral wool slabs made of stone fiber, 4 – upper grid AMN-K 300x150, 5 – lower grid AMN-K 300x150, 6 – multi-hollow floor slabs, 7 – air channel, 8 – plaster layer (cement-sand mortar)

Для решения задачи были применены тепло-влажностные и расчетные характеристики используемых строительных материалов, взятые из СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий» (табл. 1).

Таблица 1. Тепло-влажностные характеристики материалов, используемых в расчете наружных ограждающих конструкций

Table 1. Heat and humidity characteristics of materials used in the calculation of external enclosing structures

Материал Material	Коэффициент теплопроводности Coefficient of thermal conductivity λ_h Вт/(м·°C)	Коэффициент паропроницаемости Vapor permeability coefficient μ , кг/(м·с·Па)
Керамзитобетон на кварцевом песке Expanded clay concrete on quartz sand	0,56	$0,098 \cdot 10^{-11}$
Плиты минераловатные из каменного волокна Mineral wool slabs made of stone fiber	0,043	$0,31 \cdot 10^{-11}$
Железобетон Reinforced concrete	1,92	$0,03 \cdot 10^{-11}$
Штукатурка (цементно-песчаный раствор) Plaster (cement-sand mortar)	0,76	$2,5 \cdot 10^{-11}$

На рис. 2 приведены значения скорости воздуха в канале в зависимости от давления в верхней части решетки (4).

В качестве реальных эксплуатационных условий были выбраны значения парциального давления водяного пара и температуры воздуха наиболее холодной пятидневки, обеспеченностью 0.92 согласно СП 131. 13330.2018 «Строительная климатология». Граничные условия, используемые в расчете, приведены в табл. 2. Плотность, вязкость воздуха были взяты при нормальных условиях.

Таблица 2. Граничные условия, используемые в расчете
Table 2. Boundary conditions used in the calculation

	Коэффициент теплоотдачи Heat transfer coefficient, α_v , $\alpha_n \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$	Температура Temperature, $^\circ\text{C}$	Парциальное давление Partial pressure, e , Па
Внешняя External	23	-37	140
Внутренняя Internal	8,7	21	1367

Для решения задачи массопереноса в вентилируемом канале задавался перепад давлений от 0 до 6 Па, расчет велся с интервалом 1 Па.

Для повышения достоверности определения температурно-влажностных характеристик наружных ограждающих конструкций, задача (1) решалась для геометрических размеров, представленных на рис.1.

Расчет велся для условий эксплуатации А, а также для реальных условий эксплуатации, при которых значение скорости определялось в соответствии с давлением в верхней решетке на рис. 2.

Мы видим, что при значениях давления меньше 0,5 Па зависимость экспонентальная, а при дальнейшем росте давления – линейная. Расчет осуществлялся в программном комплексе Comsol Multiphysics 3.5a. Исходя из СП 50 требуемое тепловое сопротивление составляет 3,58 Вт/(м $^\circ\text{C}$), а ГСОП 6227 град/сут.

Для изучения зависимости скорости воздуха от перепада давлений в исследуемом воздуховоде решим уравнение Навье-Стокса в приближении к-е, результаты приведены на рис. 2.

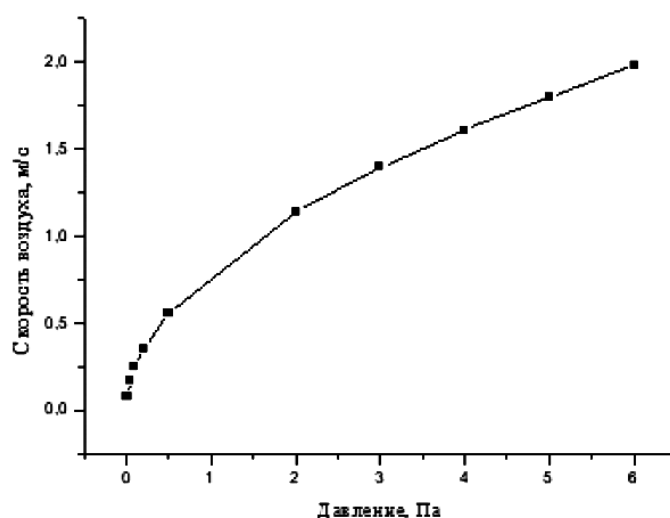


Рис. 2. Зависимость скорости воздуха в воздуховоде от приложенного давления

Fig. 2. Dependence of the air velocity in the duct on the applied pressure

Данный перепад давления можно создать с помощью естественной конвекции вследствие перепада температур. В случае если при этом скорость воздуха будет недостаточной, возможно использование различных технических устройств, приводящих к вынужденной конвекции, например, вентиляторов. Данный расчет необходимо проводить при проектировании воздуховода. Детальное изучение аэродинамических процессов выходит за рамки представленного исследования.

На рис. 3 приведены результаты расчета температуры и относительной влажности воздуха в порах материала при отсутствии движения воздуха и скорости 0,2 м/с в канале. Величина e/E характеризует потенциал выпадения влаги в исследуемой точке пространства, а при $e < E$ численно равна относительной влажности воздуха.

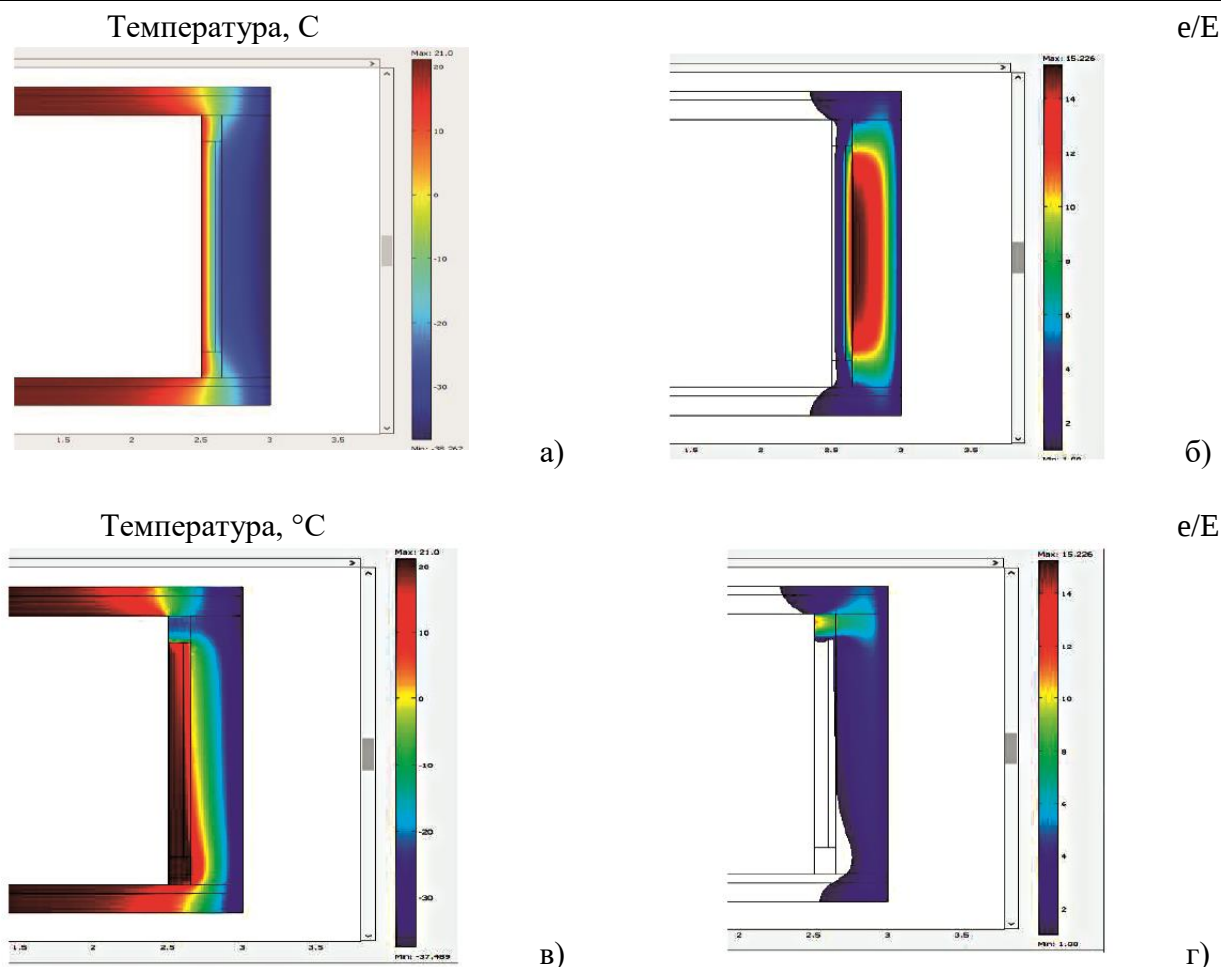


Рис. 3. Распределения температур и влажности воздуха в порах материала:

А – температура, при отсутствии движения воздуха в воздушной прослойке; Б – влажность воздуха, при отсутствии движения воздуха в воздушной прослойке; В – температура, при скорости воздуха 0,2 м/с; Г – влажность воздуха, при скорости воздуха 0,2 м/с.

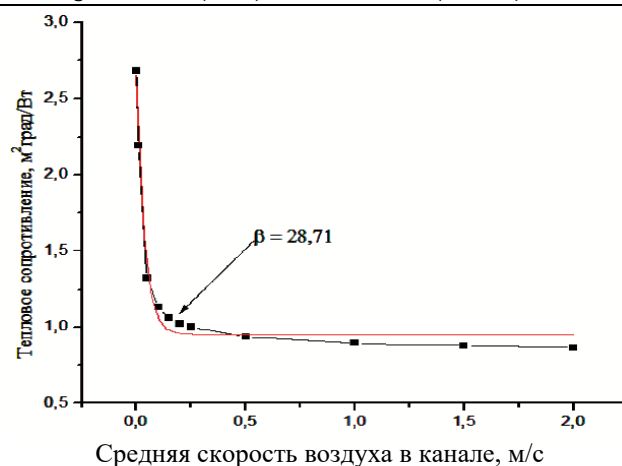
Fig. 3. Distribution of temperature and humidity in the pores of the material:

A – temperature, in the absence of air movement in the air layer; B – air humidity, in the absence of air movement in the air layer; В – temperature, at an air velocity of 0.2 m/s; Г – air humidity, at an air velocity of 0.2 m/s.

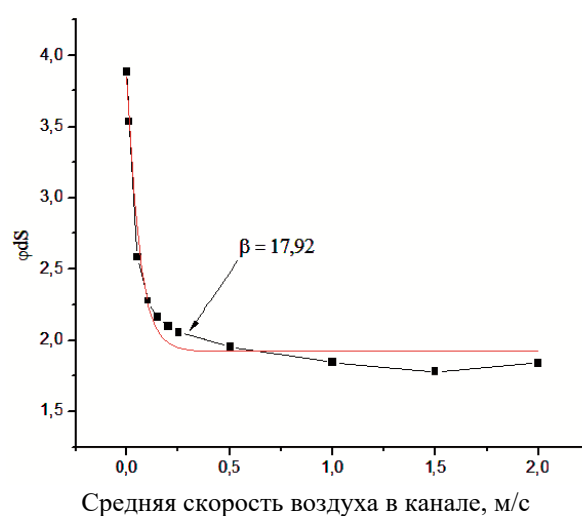
Согласно представленным результатам при увеличении скорости воздуха в воздушной прослойке происходит смещение изотерм по направлению к холодной стене рис. 3 (а и в), в тоже время значительно снижается относительная влажность воздуха в порах материала (б и г). При этом температура воздуха, выходящего из верхней решетки низкая и составляет для внешней температуры – 37 °С, составляет порядка – 20 °С. В случае прихода воздуха данной температуры в помещения будет образовываться конденсат. По сравнению с реальными условиями данная модель имеет ряд ограничений, таких как идеальные условия контакта воздуха в прослойке и несущей стеной.

В случае учета данного эффекта температура приточного воздуха незначительно повысится. Однако следует отметить, что использования данной конструкции при экстремальных температурах (самой холодной пятидневки) не целесообразно, так как приведет к образованию конденсата внутри помещения. В тоже время, смещение изотерм характеризует снижение общего теплового сопротивления стеновой конструкции.

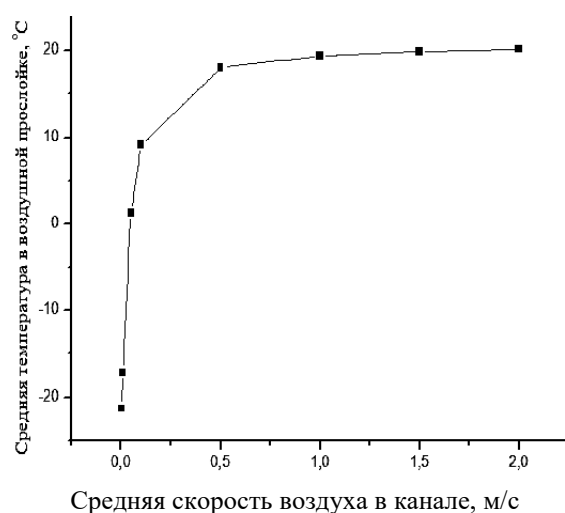
В свою очередь, снижение теплового сопротивления приводит к увеличению плотности теплового потока и, как следствие, снижение относительной влажности в порах материала. На рис. 4 приведены зависимости теплового сопротивления и величины, рассчитанной по формуле (2) от скорости воздуха в воздушной прослойке.



А)



Б)



В)

Рис. 4. Зависимость теплового сопротивления (а) и вероятности выпадения влаги в материале (б) от скорости воздуха в воздушной прослойке, (в) зависимость средней температуры воздуха в воздушной прослойке от средней скорости воздуха в канале
Fig. 4. The dependence of the thermal resistance(a) and the probability of moisture loss in the material (b) on the air velocity in the air layer, (c) the dependence of the average air temperature in the air layer on the average air velocity in the channel

Полученные результаты описываются экспоненциальной зависимостью и могут быть представлены в следующем виде:

$$I \sim e^{-\beta_1 v} \quad (4, a)$$

$$R \sim e^{-\beta_2 v} \quad (4 б)$$

где I – потенциал выпадения влаги, R – тепловое сопротивление, $\text{м}^2 \times \text{град}/\text{Вт}$; β – декремент затухания, $\text{с}/\text{м}$.

Декремент затухания характеризует влияние скорости воздушного потока на снижения потенциала выпадения влаги и теплового сопротивления. Чем значение его больше, тем скорость воздуха больше влияет на уменьшение рассматриваемой величины. Декремент затухания (β) для теплового сопротивления выше, чем для вероятности выпадения влаги.

Данный результат показывает, что использование воздушной прослойки за утеплителем и постоянное ее функционирование не целесообразно, так как теплый воздух полностью нагревает утеплитель, расположенный на внутренней поверхности стены.

На рис. 5 представлено значение плотности потока влаги через верхнюю вентиляционную решетку.

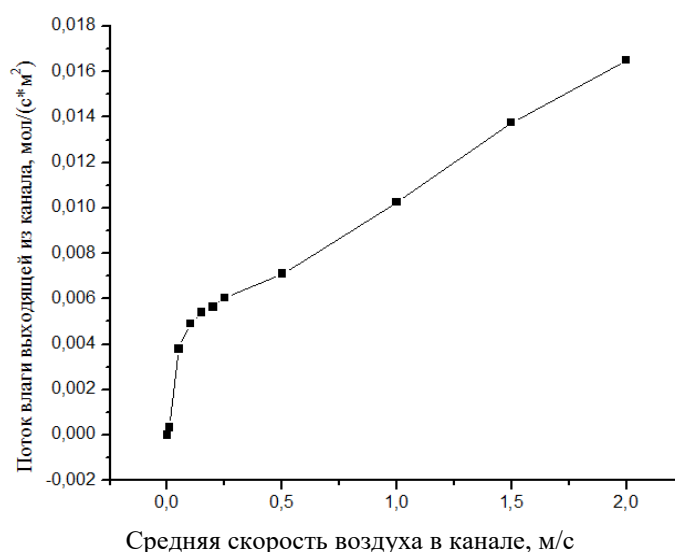


Рис. 5. Значение плотности потока влаги через верхнюю вентиляционную решетку

Fig. 5. The value of the moisture flow density through the upper ventilation grate

Как следует из представленных результатов, зависимость потока влаги из канала от скорости воздуха в канале можно разделить на два участка.

Первый, от 0 до 0,25 м/с, на котором воздушный поток полностью насыщен влагой, а его величина не позволяет полностью высушить утеплитель. Второй, где скорость воздуха в канале более 0,25 м/с. На данном отрезке величина потока влаги из канала линейно зависит от скорости воздуха, следовательно, утеплитель высыхает полностью.

Вывод. Функционирование воздуховода на всем периоде эксплуатации здания не целесообразно, так как приводит к снижению энергоэффективности конструкции, причем потенциал выпадения конденсата снижается медленней, чем тепловое сопротивление.

В тоже время периодическое использование воздуховода позволяет удалять влагу, сконденсированную при внутреннем утеплении.

Следовательно, при эксплуатации зданий для просушки утеплителя необходимо периодически использовать данную систему.

При низких скоростях воздуха в прослойке происходит полное насыщение влагой. При увеличении скорости воздуха увеличивается массоперенос, и как следствие влага полностью удаляется из утеплителя.

Следовательно, при разработке проектов, предусматривающих внутреннее утепление, целесообразно проводить расчет тепло- и массопереноса влаги в конструкции.

Библиографический список:

1. Федеральный закон "Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации" от 23.11.2009 N 261-ФЗ (последняя редакция) http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_93978/
2. Федеральный закон № 73 «Об объектах культурного наследия (памятниках истории и культуры) народов Российской Федерации» от 25.06.2002.
3. Андрейцева К.С. Особенности расчета температурных полей при проектировании ограждающих конструкций // Жилищное строительство. 2018. №6. С. 19-23.
4. Одокиенко Е.В., Алмаев А.Ю., Власова Ю.Ю. Оценка теплозащитных качеств наружных углов стен. // Градостроительство, реконструкция и инженерное обеспечение устойчивого развития городов Поволжья сборник трудов IV Всероссийской научно-практической конференции (заочной). 2015. С. 160-164.
5. Иванченко В.Т., Басов Е.В. Анализ методик расчета теплового баланса жилых зданий // Электронный сетевой политематический журнал "Научные труды КубГТУ". 2019. №2. С. 94-97.
6. Перехоженцев А.Г. Проектирование наружных стен высотных зданий с заданным температурно-влажностным режимом // Вестник ВолгГАСУ. 2017. №48 (67). С. 48-60.
7. Добросмыслов С.С., Пылаева М.М., Огорельцева Н.В., Перькова М.А. Изменение теплофизических характеристик наружных ограждающих конструкций в условиях реального температурно-влажностного режима // Известия КГАСУ. 2018. №3 (45). С. 114-120.
8. Корниенко С.В. Расчет температурно-влажностного режима наружных углов стен // Строительные материалы. 2008. №12. С. 25-27.
9. Акопьян К.А., Федотова Е.А. Температурно-влажностный режим в помещениях энергоэффективных зданий. // В сборнике: Проектирование и строительство автономных, энергоэффективных зданий сборник статей Международной научно-практической конференции. 2018. С. 13-16.
10. Гутман В.Н., Шевчук Н.О., Рапович С.П., Зубарик А.А. Совершенствование систем микроклимата путем разработки вентиляционных устройств нового поколения. // В сборнике: Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве Материалы Международной научно-практической конференции. 2009. С. 110-117.
11. Ломакина Н.Я. Климатическое районирование территории сибирского региона по температурно-влажностному и ветровому режиму пограничного слоя атмосферы // В сборнике: Современные проблемы географии и геологии к 100-летию открытия естественного отделения в Томском государственном университете: материалы IV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. 2017. С. 292-296.
12. Шкловер А.М. Температурный режим помещения и определение теплопотерь // АВОК: Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика. 2012. № 4. С. 92-97.
13. Бровко И.С., Унайбаев Б.Б., Асыллова К.Б. Влияния природно-климатических факторов на теплообмен в здании И ИХ последствия // В сборнике: Проблемы строительного производства и управления недвижимостью Сборник научных статей V Международной научно-практической конференции. 2018. С. 131-134.
14. Михеева Ю.Л. Методика учета влияния климатических факторов на температурно-влажностный режим ограждающих конструкций // Сборник: Строительство и архитектура - 2015 материалы международной научно-практической конференции. ФГБОУ ВПО "Ростовский государственный строительный университет". 2015. С. 158.
15. Пат. 2308576, Российская Федерация, МПК E04C 2/00. Наружная стена многоэтажного здания (варианты); заявитель и патентообладатель Евсеев Л.Д., Ананьев А.И., Ананьев А.А., Евсеев П.Л. №2005127230/03; заявл. 08.30.2005; опубл. 20.10.2007, Бюл. №25. 7с.
16. Пат. 184835, Российская Федерация, МПК F24F 5/00. Агрегат охлаждения и осушения воздуха системы поддержания температурно-влажностного режима; заявитель и патентообладатель Пиндзин Л.Р., Ушаков П.В., Беленков О.В., Мифтахов Р.М., Теплов В.В., Лата Е.Н., Малунов В.А., Верещагин В.П., Антонов И.В. № 2017118615; заявл. 29.05.2017; опубл. 12.11.2018, Бюл. №32. 7с.
17. Пат. 193765, Российская Федерация, G05D 27/02. Устройство контроля и коррекции температурно-влажностного режима в сооружении; заявитель и патентообладатель Данилюк С.Г., Антипов Р.Е., Гребенников М.А., Логунов А.С. №2019106558; заявл. 07.03.2019; опубл. 14.11.2019, Бюл. №32. 4с.
18. Пат. 2285868, Российская Федерация, G05D 27/02. Способ вентиляции помещения; заявитель и патентообладатель Шарапов В.И., Артемов А.А., Марченко А.В. №2005111167/06; заявл. 15.04.2005; опубл. 20.10.2006, Бюл. №29. 4с.
19. Кравчук В.Ю., Рымаров А.Г. Система реверсивной вентиляции для административных зданий // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2017. Т. 44. № 4. С. 161-169.
20. Осокина Я.А., Харитонов А.Ю. Современная система контроля температурно-влажностного режима при бетонировании массивных железобетонных конструкций // В сборнике: Современное оборудование, методы инструментального обследования и усиления зданий и сооружений Сборник научных статей по материалам Международной научно-практической конференции. 2019. С. 37-44.

21. Минливалиев А.А., Зямбаев И.В. Разработка системы контроля температурно-влажностного режима в офисном здании // В сборнике: Научные труды студентов Ижевской ГСХА сборник статей: электронный ресурс. ФГБОУВО Ижевская ГСХА. Ижевск, 2018. С. 459-462.

References:

1. Federal'nyy zakon "Ob energosberezhenii i o povyshenii energeticheskoy effektivnosti i o vnesenii izmeneniy v otдел'nyye zakonodatel'nyye akty Rossiyskoy Federatsii" ot 23.11.2009 N 261-FZ (poslednyaya redaktsiya) [Federal Law "On Energy Saving and on Increasing Energy Efficiency and on Amendments to Certain Legislative Acts of the Russian Federation" dated 23.11.2009 N 261-FZ (last edition) http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_93978/ (In Russ)]
2. Federal'nyy zakon № 73 «Ob ob'yektakh kul'turnogo naslediya (pamyatnikakh istorii i kul'tury) narodov Rossiyskoy Federatsii» ot 25.06.2002. [Federal Law No. 73 "On Cultural Heritage Objects (Historical and Cultural Monuments) of the Peoples of the Russian Federation" dated 25.06.2002. (In Russ)]
3. Andreytseva K.S. Features of the calculation of temperature fields in the design of building envelopes [Osobennosti rascheta temperaturnykh polej pri proektirovanii ograzhdayushchih konstrukcij]. // Housing construction. 2018. No. 6. pp. 19-23. (In Russ)]
4. Odokienko E.V., Almaev A.Yu., Vlasova Yu.Yu. Assessment of the heat-shielding qualities of the outer corners of the walls [Ocenka teplozashchitnykh kachestv naruzhnykh uglov sten]. // In the collection: Urban planning, reconstruction and engineering support for sustainable development of the Volga cities collection of works of the IV All-Russian Scientific and Practical Conference (in absentia). 2015. pp. 160-164. (In Russ)]
5. Ivanchenko V.T., Basov E.V. Analysis of methods for calculating the heat balance of residential buildings [Analiz metodik rascheta teplovogo balansa zhilykh zdaniy]. // Electronic network political journal "Scientific works of KubGTU". 2019. No. 2. pp. 94-97 (In Russ)]
6. Perekhodzhenyev A.G. Design of the outer walls of high-rise buildings with a given temperature and humidity regime [Proektirovanie naruzhnykh sten vysoknykh zdaniy s zadannym temperaturno-vlazhnostnym rezhimom]. // Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture. 2017. No. 48 (67). pp. 48-60. (In Russ)]
7. Dobrosmyslov S.S., Pylaeva M.M., Ogoreltseva N.V., Perkova M.A. Changes in the thermophysical characteristics of external walling in real temperature and humidity conditions [Izmenenie teplofizicheskikh harakteristik naruzhnykh ograzhdayushchih konstrukcij v usloviyakh real'nogo temperaturno-vlazhnostnogo rezhima]. // News of Kazan State University of Architecture and Civil Engineering. 2018. No. 3 (45). pp. 114-120. (In Russ)]
8. Kornienko S.V. Calculation of the temperature and humidity regime of the outer corners of the walls [Raschet temperaturno-vlazhnostnogo rezhima naruzhnykh uglov sten]. // Building materials. 2008. No. 12. pp. 25-27. (In Russ)]
9. Akopyan K.A., Fedotova E.A. Temperature and humidity conditions in the premises of energy-efficient buildings [Temperaturno-vlazhnostnyy rezhim v pomeshcheniyakh energoэффективных zdaniy]. // Proektirovanie i stroitel'stvo avtonomnykh, energoэффективных zdaniy sbornik statej Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. 2018. pp. 13-16. (In Russ)]
10. Gutman V.N., Shevchuk N.O., Rapovich S.P., Zubarik A.A. Improving microclimate systems by developing a new generation of ventilation devices [Sovershenstvovanie sistem mikroklimata putem razrabotki ventilyacionnykh ustrojstv novogo pokoleniya]. // Nauchno-tehnicheskij progress v selskhozaystvennom proizvodstve. Materialy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. V 3-h tomah. Glavnyy redaktor P.P. Kazakevich. 2009. pp. 110-117. (In Russ)]
11. Lomakina N. Y. Climatic zoning of the siberian region according to the temperature and humidity and wind regime the atmospheric boundary layer [Klimaticheskoe rajonirovanie territorii sibirskogo regiona po temperaturno-vlazhnostnomu i vetrovomu rezhimu pogranichnogo sloya atmosfery]. // Sovremennye problemy geografii i geologii k 100-letiyu otkrytiya estestvennogo otdeleniya v Tomskom gosudarstvennom universitete: materialy IV Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastom gosudarstvennom universitete. 2017. pp. 292-296. (In Russ)]
12. Shklover A.M. Room temperature and heat loss [Temperaturnyy rezhim pomeshcheniya i opredelenie teplopoter]. // ABOK: Ventilation, Heating, Air Conditioning, Heat Supply and Building Thermal Physics. 2012. No 4. Pp. 92-97. (In Russ)]
13. Brovko I.S., Unajbaev B.B., Asylova K.B. Influence of climatic factors on heat and moisture exchange in a building and their consequences [Vliyaniya prirodno-klimaticheskikh faktorov na teplo-vлагообмен v zdanii I ih posledstviya]. // Problemy stroitel'nogo proizvodstva i upravleniya nedvizhimost'yu Sbornik nauchnykh statej V Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. 2018. pp. 131-134. (In Russ)]
14. Mikheeva Y. L. Methodology for taking into account the influence of climatic factors on the temperature and humidity conditions of building envelopes [Metodika ucheta vliyaniya klimaticheskikh faktorov na temperaturno-vlazhnostnyy rezhim ograzhdayushchih konstrukcij]. // Stroitel'stvo i arhitektura - 2015 materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. FGBOU VPO "Rostovskij gosudarstvennyy stroitel'nyy universitet", Soyuz stroitelej yuzhnogo federal'nogo okruga, Associaciya stroitelej Dona. 2015. Pp. 158. (In Russ)]
15. Evseev L.D., Anan'ev A.I., Anan'ev A.A., Evseev P.L. The outer wall of a multi-storey building. Patent RF, No. 2005127231, 2005. (In Russ)]

16. Pindzin L.R., Ushakov P.V., Belenkov O.V., Miftahov R.M., Teplov V.V., Lata E.N., Malunov V.A., Vereshchagin V.P., Antonov I.V. Unit for cooling and dehumidification of air of the system for maintaining temperature and humidity conditions. Patent RF, no. 2017118615, 2017. (In Russ]

17. Danilyuk S.G., Antipov R.E., Grebennikov M.A., Logunov A.S. Device for control and correction of temperature and humidity conditions in the structure. Patent RF, no. 2005127231, 2019106558, 2019. (In Russ]

18. Sharapov V.I., Artemov A.A., Marchenko A.V. Room ventilation method. Patent RF, no. 2005111167/06, 2005. (In Russ]

19. Kravchuk V.Yu., Rymarov A.G. Reverse ventilation system for office buildings [Sistema reversivnoj ventilatsii dlya administrativnykh zdaniy]. Vestnik Daghestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki.. 2017. Vol. 44. No 4. pp. 161-169. (In Russ]

20. Osokina YA.A., Haritonov A.YU. Modern temperature and humidity control system for concreting massive reinforced concrete structures [Sovremennaya sistema kontrolya temperaturno-vlazhnostnogo rezhima pri betonirovanii massivnykh zhelezobetonnykh konstrukcij]. // Sovremennoe oborudovanie, metody instrumental'nogo obsledovaniya i usileniya zdaniy i sooruzheniy Sbornik nauchnykh statej po materialam Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. 2019. pp. 37-44. (In Russ]

21. Minlivaliyev A.A., Zyambayev I.V. Development of the temperature and humidity control system in an office building [Razrabotka sistemy kontrolya temperaturno-vlazhnostnogo rezhima v ofisnom zdanii]. // Nauchnye trudy studentov Izhevskoj. GSKHA sbornik statej: elektronnyj resurs. FGBOU VO Izhevskaya GSKHA. Izhevsk, 2018. pp. 459-462. (In Russ]

Сведения об авторах:

Добросмыслов Сергей Сергеевич, кандидат технических наук, научный сотрудник ФИЦ КНЦ СО РАН, доцент кафедры проектирования зданий и экспертизы недвижимости; dobrosmislov.s.s@gmail.com.

Рожкова Наталья Николаевна, старший преподаватель кафедры проектирования зданий и экспертизы недвижимости; severdom24@yandex.ru.

Рожков Александр Федорович, кандидат технических наук, доцент кафедры строительных конструкций и управляемых систем; labsfu@yandex.ru.

Перькова Марина Александровна, старший преподаватель кафедры геометрического моделирования и компьютерной графики, аспирант кафедры строительных конструкций и управляемых систем; dero-gai@mail.ru.

Алиев Семур Асиф оглы, магистр кафедры проектирования зданий и экспертизы недвижимости; semyr.aliev97@yandex.ru.

Information about the authors:

Sergey S. Dobrosmyslov, Cand. Sci. (Technical), Researcher of the Federal Research Center of the KSC SB RAS, Assoc. Professor of the Department of Building Design and Real Estate Expertise dobrosmislov.s.s@gmail.com.

Natalia N. Rozhkova, Senior Lecturer at the Department of Building Design and Real Estate Expertise; severdom24@yandex.ru.

Alexander F. Rozhkov, Cand. Sci. (Technical), Assoc. Prof. of the Department of Building Structures and Controlled Systems; labsfu@yandex.ru.

Marina A. Perkova, Senior Lecturer of the Department of Geometric Modeling and Computer Graphics, Postgraduate Student of the Department of Building Structures and Controlled Systems; dero-gai@mail.ru.

Semur A. Aliev, Master in the Department of Building Design and Real Estate Expertise; semyr.aliev97@yandex.ru.

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 27.05.2021.

Принята в печать 14.06.2021.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 27.05.2021.

Accepted for publication 14.06.2021.

Для цитирования: Д.Ф. Карпов, М.В. Павлов. Оценка теплозащитных свойств ограждающих конструкций строительных объектов по анализу термограмм. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2021;48(2):92-102. DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-2-92-102

For citation: D.F. Karpov, M.V. Pavlov. Assessing thermal properties of enclosing structures of construction facilities by analysis of thermograms. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2021; 48 (2): 92-102. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-2-92-102

**СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
BUILDING AND ARCHITECTURE**

УДК 772.962:699.86

DOI: 10.21822/2073-6185-2021-48-2-92-102

**ОЦЕНКА ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ
СТРОИТЕЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ ПО АНАЛИЗУ ТЕРМОГРАММ**

Д.Ф. Карпов, М.В. Павлов

Вологодский государственный университет,
160000, г. Вологда, ул. Ленина, д. 15, Россия

Резюме. Цель. Одним из эффективных способов оценки тепловой защиты строительных объектов различного назначения является тепловой контроль. **Метод.** В соответствии с действующим на территории Российской Федерации национальным стандартом «Метод тепловизионного контроля качества теплоизоляции ограждающих конструкций» результаты тепловизионного мониторинга объектов капитального и завершённого строительства в зависимости от поставленных целей и задач делятся на качественные и количественные. Качественная оценка заключается в компьютерной обработке и визуальной расшифровке термограмм с помощью специализированного программного обеспечения. Количественный анализ термограмм заключается в определении и численном сравнении значений параметров реперных участков и характеристик обнаруженных дефектов в объекте теплового контроля. **Результат.** В работе изложены специфика и результаты качественного и количественного анализа термограмм (тепловых изображений), полученных по результатам термографирования фрагментов наружных ограждающих конструкций объекта завершённого строительства – многоквартирного дома. Проанализированы существующие методики количественной оценки термограмм, взятые из нормативных документов и методических рекомендаций, а также представлены конкретные примеры их применения. **Вывод.** Тепловизионная диагностика позволяет качественно и количественно оценить уровень тепловой защиты строительной оболочки объекта контроля посредством «расшифровки» термограмм и сравнения полученных расчетных параметров с нормативными показателями.

Ключевые слова: теплозащитные свойства, ограждающая конструкция, объекты капитального и завершённого строительства, инженерно-технические системы, тепловой контроль, тепловизионная съёмка, термограмма, тепловое изображение, качественный и количественный анализ.

**ASSESSING THERMAL PROPERTIES OF ENCLOSING STRUCTURES
OF CONSTRUCTION FACILITIES BY ANALYSIS OF THERMOGRAMS**

D.F. Karpov, M.V. Pavlov

Vologda State University,
15 Lenin Str., Vologda 160000, Russia

Abstract. Objective. One of the most effective ways to assess thermal protection of construction facilities of various applications is thermal control. **Methods.** According to the national standard “Method for thermal imaging quality control of thermal insulation of enclosing structures” in force on the Russian Federation territory, the results of thermal imaging monitoring of capital and completed construction facilities are divided into qualitative and quantitative depending on set goals and objec-

tives. Qualitative assessment involves computer processing and visual interpretation of thermograms using specialized software. Quantitative analysis of thermograms involves determining and numerically comparing parameters of reference areas and characteristics of defects detected in an object being under thermal control. **Results.** The paper describes particular characteristics and results of qualitative and quantitative analysis of thermograms (thermal images) obtained via thermography of fragments of external enclosing structures of a completed construction facility—an apartment building. The paper analyses existing methods of a quantitative assessment of thermograms described in regulatory documents and methodological recommendations, and presents specific examples of their application. **Conclusion.** Thermal imaging diagnostics makes it possible to qualitatively and quantitatively assess the level of thermal protection of the outer shell of an object under control by “decoding” thermograms and comparing calculated parameters with standard indicators.

Keywords: thermal properties, enclosing structure, capital and completed construction facilities, engineering systems, thermal control, thermal imaging, thermogram, thermal image, qualitative and quantitative analysis.

Введение. Для жилищно-коммунального и энергетического секторов Российской Федерации решение вопросов энерго- и ресурсосбережения, повышения энергоэффективности объектов капитального и завершеного строительства, инженерно-технических систем и подсистем жизнеобеспечения с каждым годом становится все более актуальным и практически значимым. По сравнению с другими странами мира, переход на альтернативные и возобновляемые виды энергии происходит достаточно медленно. Этому способствует существующий энергетический потенциал России, а также тот факт, что для большинства ее территорий инновационные технологии энергосбережения и повышения энергоэффективности, такие как, пассивное и энергоэффективное домостроение, солнечная и ветровая энергетика, биотопливо, тепловые насосы, минимально рентабельны [1].

Постановка задачи. В связи с этим, на текущий момент времени сверхважным является поиск путей рационального снижения потребления невозобновляемых топливно-энергетических ресурсов строительными объектами и инженерно-техническими системами, а не глобально-кардинальное переустройство отечественной энергетической системы. Для решения этих вызовов современности необходимо, в первую очередь, уметь правильно определять потенциал энергосбережения эксплуатируемых объектов капитального и завершеного строительства, систем и подсистем жизнеобеспечения.

Методы исследования. Измерительные тепловизионные системы, как правило, тепловизоры, принцип действия которых базируется на методе теплового неразрушающего контроля или инфракрасной диагностике, качественно и быстро справляются с решением задач по оценке теплозащитных свойств строительных объектов различного назначения (рис. 1).



Рис. 1. Примеры использования тепловизионной техники в оценке теплозащитных свойств строительных объектов и тепловом контроле инженерно-технических систем

Fig. 1. Examples of the use of thermal imaging equipment in the assessment of heat-shielding properties of building objects and thermal control of engineering systems

Тепловизионная техника позволяет оперативно получать и анализировать точную тепловую «картину» в виде распределения радиационных температур по поверхности контролируемых объектов [2–20]. Кроме тепловизора в процессе тепловизионного контроля применяется и

другое вспомогательное оборудование, например: пирометр, термогигрометр, термоанемометр, измеритель плотности теплового потока, лазерный дальномер [3].

Тепловой неразрушающий контроль является одним из наиболее прогрессивных направлений оценки качества функционирования объектов строительства, энергетики, инженерно-технических систем различного назначения [3, 5, 9, 11, 13, 15]. Данный вид диагностики обеспечивает возможность безопасного мониторинга теплового состояния объектов контроля без вывода их из эксплуатации, выявления дефектов на ранней стадии их развития, сокращение затрат на техническое обследование. Одним из эффективных методов теплового неразрушающего контроля является тепловизионное обследование, отвечающее и соответствующее современным требованиям экологичности, охраны окружающей природной среды, безопасности жилья и городской среды. Тепловизионное обследование является частью энергетического обследования, по результатам которого объекту контроля присваивается класс энергетической эффективности, и далее эта информация заносится в энергетический паспорт объекта [2, 6, 17].

Тепловизионное обследование объектов контроля любого назначения подразумевает комплекс работ, требующих наличия квалифицированного специалиста или специалистов, а также соответствующего приборно-измерительного оборудования [2, 4, 6, 17, 20]. Исполнитель работ должен обладать навыками эксплуатации тепловизионной техники, знанием правил проведения тепловизионной съемки, умением выполнять обработку полученной информации. Итоговой частью тепловизионного обследования объекта контроля является отчет о выполненной работе.

Согласно [21] тепловизированию подвергаются наружные и внутренние поверхности ограждающих конструкций (рис. 2).



Рис. 2. Примеры термографирования наружных и внутренних поверхностей ограждающих конструкций жилых строительных объектов, систем кондиционирования микроклимата
Fig. 2. Examples of thermography of external and internal surfaces of enclosing structures of residential building objects, microclimate conditioning systems

Тепловизионная съемка проводится в отопительный сезон. При этом следует избегать атмосферных осадков, туманов, задымленности. Обследуемые поверхности не должны находиться в зоне прямого и отраженного солнечного облучения в течение 12 ч до проведения измерений. Термографирование не рекомендуется осуществлять, если значение интегрального коэффициента излучения поверхности объекта контроля менее 0,70. Места установки тепловизора выбирают таким образом, чтобы поверхность объекта находилась в прямой видимости под углом наблюдения не менее 60°. По обзорной термограмме наружной поверхности ограждающих конструкций выявляют участки с нарушенными теплозащитными свойствами, которые затем подвергают детальному термографированию с внутренней стороны ограждающих конструкций [2, 6, 18].

Термографирование может быть обзорным и детальным [3–5]. Обзорное термографирование – это тепловизионная съемка наружных и/или внутренних поверхностей ограждающих конструкций. Детальное термографирование – это тепловизионная съемка отдельно выделенных участков наружных и/или внутренних поверхностей ограждающих конструкций. Обзорное и детальное термографирование выполняется с сохранением термограмм в память тепловизора и/или на внешних съемных носителях памяти с обязательным составлением отчета о тепловизионном обследовании.

Температурные поля поверхностей объекта контроля получают на экране тепловизора, а также на экранах вспомогательных устройств в виде псевдоцветного или монохромного изображения изотермических поверхностей [3, 5, 12, 14, 16]. Регистрацию термограмм проводят последовательно по намеченным участкам с покадровой записью тепловых изображений на карту памяти тепловизора с последующим их перемещением на физическую память персонального компьютера. По окончании тепловизионного обследования производят визуальный контроль поверхности объекта. При необходимости измеряют и определяют дополнительные параметры с целью выполнения специальных расчетов количественных характеристик объекта контроля [6, 8, 10, 12].

Обсуждение результатов. Результаты тепловизионной диагностики могут быть оценены как качественно, так и количественно [2, 4, 7, 10, 12, 14, 17]. В случае качественного анализа термограмм производится поиск тепловых аномалий по температурному перепаду в местонахождении предполагаемого дефекта и эталонной зоны [12, 14, 20]. Последняя должна выбираться аналогично контролируемой и находиться в тех же условиях теплообмена (располагаться вблизи обследуемого участка).

Существуют правила качественного анализа термограмм, которые позволяют повысить эффективность поиска и оценки тепловых аномалий [2, 4, 7, 10, 12, 14]:

1. Дополнение термограммы видимым изображением (фотографией). Компьютерное совмещение видимого и теплового изображений.

2. При прочих равных условиях внутренний тепловизионный осмотр предпочтительнее наружной тепловизионной съемки.

3. Детальность изображения, качество термограммы ухудшается при удалении от объекта контроля. Кроме того, водяные пары, находящиеся в воздухе, поглощают длинноволновое инфракрасное излучение и, как следствие, искажают показания измерительного прибора. Тепловизионную съемку следует проводить на минимально возможном расстоянии от объекта контроля.

4. Неокрашенные металлические элементы зданий и сооружений выглядят, как правило, более холодными, чем на самом деле, за исключением ситуаций, когда имеет место интенсивная внешняя подсветка.

5. Отопительные приборы, расположенные в заглубленной нише наружной стены, создают избыточные потери тепловой энергии через ограждения здания, которые могут быть ошибочно приняты за строительные дефекты.

6. Тепловые аномалии в области светопрозрачных конструкций могут быть обусловлены открытыми створками, форточками, фрамугами и др.

Качественный анализ тепловых изображений позволяет определить местонахождение и охарактеризовать в общих чертах дефект строительной конструкции. Данный вид оценки технического состояния объекта контроля основывается исключительно на температурном поле, которое формирует тепловизор, а, точнее на разности показаний температур на однородном по конструктивным характеристикам элементе ограждения. Наличие резких перепадов температур и минимальных (или максимальных в зависимости от места проведения тепловизионной съемки) температур, сосредоточенных в определенной области термограммы, дает все основания полагать о наличии тепловой аномалии, а значит, и о дефекте строительной конструкции.

Количественную оценку тепловых аномалий производят с целью установить степень их опасности для нормального функционирования здания. Обычно результаты количественного анализа сравнивают с эталонными значениями, которые, как правило, регламентированы различными нормативными документами (государственными стандартами, сводами правил и т. п.).

Рассмотрим некоторые варианты количественного анализа тепловых изображений, которые предлагают различные нормативные акты и рекомендательные документы (методические рекомендации). В соответствии с [21] количественный анализ тепловых изображений основан на расчете локальных относительных (по отношению к базовому участку) сопротивлений

теплопередаче. Значение относительного сопротивления теплопередаче $\bar{R}(x, y)$ в выбранной точке на поверхности ограждающей конструкции определяется следующим образом:

– для внутренних обследований:

$$\bar{R}_{\text{вн}}(x, y) = 1 + \frac{\theta(x, y)}{t_{\text{вн}} - \tau_{\text{вн}}^{\text{б}} - \theta(x, y)}; \quad (1)$$

– для наружных обследований:

$$\bar{R}_{\text{н}}(x, y) = 1 + \frac{\theta(x, y)}{t_{\text{н}} - \tau_{\text{н}}^{\text{б}} - \theta(x, y)}, \quad (2)$$

где $\theta(x, y)$ – разность между температурой $\tau(x, y)$ изотермы, проходящей через точку с координатами x и y на соответствующей поверхности ограждающей конструкции, и температурой поверхности базового участка $\tau_{\text{б}}$, °C; $t_{\text{вн}}$ и $t_{\text{н}}$ – соответственно температура внутреннего и наружного воздуха в зоне исследуемого фрагмента, °C; $\tau_{\text{вн}}^{\text{б}}$ и $\tau_{\text{н}}^{\text{б}}$ – соответственно температура поверхности базового участка при внутренних и наружных обследованиях, °C.

При этом значение случайной относительной погрешности определения относительного сопротивления теплопередаче $\delta\bar{R} = \Delta\bar{R}/\bar{R}$ вычисляется соответственно по уравнениям:

– для внутренних обследований:

$$\delta\bar{R}_{\text{вн}} = \left| \frac{1}{t_{\text{вн}} - \tau_{\text{вн}}^{\text{б}}} \right| \sqrt{\left[\frac{\theta(x, y)}{t_{\text{вн}} - \tau_{\text{вн}}^{\text{б}}} \Delta t_{\text{вн}} \right]^2 + \left[\frac{\theta(x, y)}{t_{\text{вн}} - \tau_{\text{вн}}^{\text{б}}} \Delta \tau_{\text{вн}}^{\text{б}} \right]^2} + \Delta \theta^2; \quad (3)$$

– для наружных обследований:

$$\delta\bar{R}_{\text{н}} = \left| \frac{1}{t_{\text{н}} - \tau_{\text{н}}^{\text{б}}} \right| \sqrt{\left[\frac{\theta(x, y)}{t_{\text{н}} - \tau_{\text{н}}^{\text{б}}} \Delta t_{\text{н}} \right]^2 + \left[\frac{\theta(x, y)}{t_{\text{н}} - \tau_{\text{н}}^{\text{б}}} \Delta \tau_{\text{н}}^{\text{б}} \right]^2} + \Delta \theta^2, \quad (4)$$

где Δt , $\Delta \tau$ и $\Delta \theta$ – значения абсолютных случайных погрешностей определения температуры воздуха и базового участка, а также разностей температур поверхности ограждающей конструкции, °C.

На рис. 3 представлены некоторые результаты тепловизионной съемки наружных ограждающих конструкций жилого здания в городе Вологда, Россия.

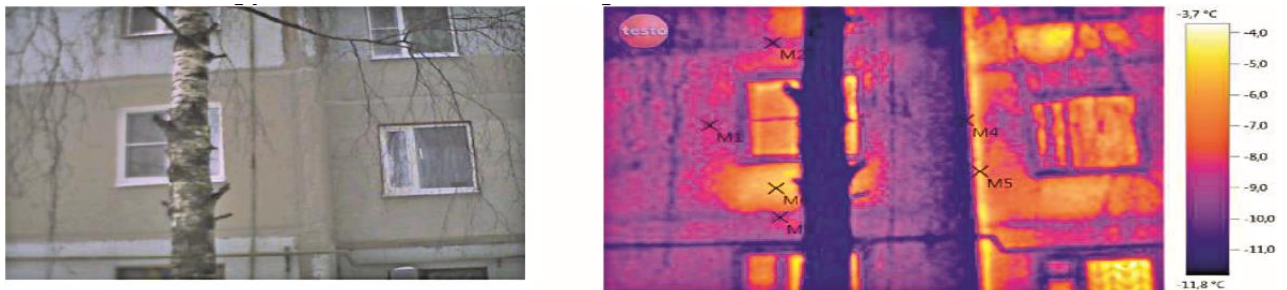


Рис. 3. Фотография (слева) и тепловое изображение (справа) по результатам тепловизионной съемки фрагмента наружных ограждающих конструкций многоквартирного жилого дома
Fig. 3. Photo (left) and thermal image (right) based on the results of thermal imaging of a fragment of the external enclosing structures of an apartment building

Поясним термограмму на рис. 3:

1. M1: –8,4 °C; M2: –8,9 °C; M3: –8,7 °C; M4: –10,9 °C; M5: –6,2 °C; M6: –5,7 °C.
2. M1, M2, M3, M4 – без дефектов; M5 – тепловой мост в зоне вертикального стыка панельных плит; M6 – избыточные тепловые потери в зоне расположения ниши отопительного прибора.
3. Термографирование выполнено тепловизором “Testo 875-2”.

Приведем пример расчета. Исходные данные для выполнения расчета: $t_n = -11,3\text{ }^{\circ}\text{C}$; $\tau_{\text{вн}}^6 = -8,4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Для «горячей» точки М6 имеем:

$$\theta(\text{М6}) = \tau_{\text{н}}^{\text{М6}} - \tau_{\text{н}}^6 = -5,7 - (-8,4) = 2,7\text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Тогда по выражению (2) имеем:

$$\bar{R}_{\text{н}}(\text{М6}) = 1 + \frac{2,7}{-11,3 - (-8,4) - 2,7} = 0,518.$$

В итоге имеем сопротивление теплопередаче аномальной зоны ограждающей конструкции почти в два раза меньше термического сопротивления базового участка наружной стены.

Случайная относительная погрешность измерений величины $\bar{R}_{\text{н}}$ при $\Delta t_{\text{н}} = \pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\Delta \tau_{\text{н}}^6 = \pm 0,168\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $\Delta \theta = \pm 0,282\text{ }^{\circ}\text{C}$ по выражению (4) составила:

$$\delta \bar{R}_{\text{н}} = \left| \frac{1}{-11,3 - (-8,4)} \right| \cdot \sqrt{\left[\frac{2,7}{-11,3 - (-8,4)} \cdot 0,5 \right]^2 + \left[\frac{2,7}{-11,3 - (-8,4)} \cdot 0,168 \right]^2} + 0,282^2 = 0,195$$

Наиболее известным способом количественного анализа тепловых изображений является определение участков ограждающих конструкций с повышенными теплопотерями, согласно действующим сводам правил (СП 23-101-2004 и СП 50.13330.2012).

В этом случае рассчитываются сопротивления теплопередаче R_o , $\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$, для базового и других характерных участков и сравниваются с требуемым значением.

На данном этапе необходимо разделить ограждающие конструкции здания на стены, окна, цоколь и в дальнейшем для каждой из этих поверхностей производить отдельные вычисления сопротивления теплопередаче (РД 153-34.0-20.364-00).

Участки ограждающих конструкций с повышенными тепловыми потерями выявляют путем сравнения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций, полученного в результате натурных измерений, с требуемым значением, определяемым в соответствии с формулой (СП 50.13330.2012):

$$R_o^{\text{норм}} = \frac{t_{\text{вн}} - t_{\text{н}}}{\Delta t_{\text{н}} \alpha_{\text{вн}}}, \text{ м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{Вт}, \quad (5)$$

где $t_{\text{вн}}$ – расчетная температура внутреннего воздуха, $^{\circ}\text{C}$.

Для жилых зданий принимается в зависимости от расчетной температуры наружного воздуха. В данном случае, согласно табл. 1 (ГОСТ 30494-2011), температура внутреннего воздуха будет равна $t_{\text{вн}} = 21\text{ }^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{н}}$ – расчетная температура наружного воздуха в холодный период года, $^{\circ}\text{C}$ принимается равной средней температуре наиболее холодной пятидневки обеспеченностью 0,92.

Для климатических условий города Вологды, согласно табл. 3.1* (СП 131.13330.2018), температура наружного воздуха составит $t_{\text{н}} = -32\text{ }^{\circ}\text{C}$; $\Delta t_{\text{н}}$ – нормируемый температурный перепад, $^{\circ}\text{C}$, между температурой внутреннего воздуха $t_{\text{вн}}$, $^{\circ}\text{C}$, и температурой внутренней поверхности ограждающей конструкции $\tau_{\text{вн}}$, $^{\circ}\text{C}$. Согласно таблице 5 (СП 50.13330.2012), для наружных стен жилых зданий имеем перепад температур $\Delta t_{\text{н}} = 4,0\text{ }^{\circ}\text{C}$; $\alpha_{\text{вн}}$ – коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности конструкции, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$.

По данным табл.4 (СП 50.13330.2012) для наружных стен коэффициент теплоотдачи $\alpha_{\text{вн}} = 8,7\text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$.

В итоге нормируемое значение сопротивления теплопередаче наружной стены жилого здания по уравнению (5) составит:

$$R_o^{\text{норм}} = \frac{21 - (-32)}{4,0 \cdot 8,7} = 1,523\text{ м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{Вт}.$$

Для нахождения сопротивления теплопередаче по результатам натурных измерений можно воспользоваться следующим выражением:

$$R_o^{\text{факт}} = \frac{1}{\alpha_n} \frac{t_{\text{вн}} - t_n}{\tau_n - t_n}, \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}, \quad (6)$$

где α_n – коэффициент теплоотдачи наружной поверхности конструкции, Вт/(м²·°C).

По данным (ГОСТ Р 54852-2011) при скорости ветра $w_n = 1,0$ м/с коэффициент теплоотдачи $\alpha_n = 11$ Вт/(м²·°C); τ_n – температура наружной поверхности ограждающей конструкции, найденная по результатам термографирования, °C.

Рассмотрим наружную стену жилого здания (рис. 3). На реперном участке средняя температура поверхности стены равна $\tau_n^6 = -8,4$ °C, в зоне температурной аномалии – $\tau_n^{\text{М6}} = -5,7$ °C. Тогда по формуле (6) имеем результаты:

$$R_o^{\text{факт}} = \frac{1}{11} \cdot \frac{21,3 - (-11,3)}{-8,4 - (-11,3)} = 1,022 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт},$$
$$R_o^{\text{факт}}(\text{М6}) = \frac{1}{11} \cdot \frac{21,3 - (-11,3)}{-5,7 - (-11,3)} = 0,529 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}.$$

Проанализировав полученные в примере результаты, делаем вывод о том, что фактическое сопротивление теплопередаче наружной стены здания не соответствует санитарно-гигиеническим требованиям (5).

Отметим несколько существенных и принципиальных моментов, касающихся качественно-количественного анализа тепловых изображений (термограмм), полученных в процессе термографирования различных объектов строительства и их конструктивных элементов, в оценке теплозащитных свойств ограждающих конструкций строительных объектов.

Во-первых, качественный анализ термограмм ограничивается информацией, содержащейся в самих тепловых изображениях, зафиксированных тепловизором. В этом случае идентификация точных температурных данных об объекте тепловизионного контроля не является обязательным условием, так как конечной целью качественного анализа термограмм является выявление дефектов.

Во-вторых, количественная оценка тепловых изображений направлена на расчет конкретных теплотехнических параметров. Причем, в данном случае, количественные результаты термографирования сопровождаются компьютерной обработкой полученных термограмм в специализированных прикладных программных средах для определения температурных полей по поверхности объекта тепловизионного контроля.

И, в третьих, тепловой контроль в строительной термографии, на основе комплексного качественно-количественного анализа термограмм тепловизионной съемки, позволяет делать выводы о тепловой защите отдельных конструктивных элементов или всего объекта контроля.

Комплексное решение обозначенных задач и реализация возможностей качественно-количественной оценки термограмм в процессе строительного термографирования позволяют ответить на вопрос: «Соответствует ли объект контроля действующим требованиям по уровню тепловой защиты или нет?». Если «Нет», то составляется список возможных энергосберегающих мероприятий, направленных на полное или частичное решение данной проблемы [2, 4].

К примеру, в случае обнаружения локальных (фрагментарных) избыточных тепловых потерь через наружные ограждающие конструкции строительного объекта таким энергосберегающим мероприятием может быть: «наружная тепловая изоляция стен с помощью напыления пенополиуретана с защитным покрытием или жидкого утеплителя».

Многочисленные апробации представленного качественно-количественного метода анализа тепловых изображений в оценке теплозащитных свойств объектов капитального и завершеного строительства, а также инженерно-технических систем и подсистем жизнеобеспечения, подтверждают высокую эффективность и надежность его применения [2, 4, 6–8, 10, 12, 14, 16–18, 20], а также адекватны и не противоречат результатам, полученным по методикам, пред-

ставленным в отечественных нормативных документах (ГОСТ Р 54852-2011, РД 153-34.0-20.364-00).

Вывод. Подводя итог, констатируем, что тепловизионный контроль, благодаря оперативности, наглядности и достоверности получаемых результатов, зарекомендовал себя как один из основных способов обследования и технической диагностики различных объектов капитального и завершеного строительства, систем и подсистем жизнеобеспечения [1–20].

Представленные результаты в очередной раз подтверждают факт того, что тепловизионная диагностика позволяет качественно и количественно оценить уровень тепловой защиты строительной оболочки объекта контроля посредством «расшифровки» термограмм и сравнения полученных расчетных параметров с нормативными показателями.

Отметим также, что кроме сферы строительства, тепловизионные обследования, наряду с тепловизионной техникой, нашли широкое практическое применение в различных отраслях промышленности и производства, таких как: энергетика, металлургия, электроснабжение, теплоснабжение, электроника.

Активное применение тепловизионного контроля наблюдается в медицине, при термометрии людей в дошкольных и образовательных учреждениях, на вокзалах и в аэропортах. Причем в зависимости от объекта контроля технологии проведения тепловизионного мониторинга могут отличаться [3, 5, 17, 20].

Библиографический список:

1. Окунев, А. Ю. Современные подходы к тепловизионному обследованию строительных объектов / А. Ю. Окунев, Е. В. Левин, К. С. Шагинян // Жилищное строительство. 2012. № 6. С. 7-9.
2. Карпов, Д. Ф. Комплексная энергосберегающая диагностика технического состояния ограждающих конструкций объектов капитального строительства и инженерных систем на основе теплового контроля / Д. Ф. Карпов, М. В. Павлов, А. А. Синицын // Научно-технический журнал «Энергосбережение и водоподготовка». 2020. № 2 (124). С. 29-33.
3. Вавилов, В. П. Тепловидение и тепловой контроль для инженеров / В. П. Вавилов. Изд. 1-е. Москва: Издательский дом «СПЕКТР». 2017. 72 с.
4. Карпов Д. Ф. Некоторые особенности и результаты теплового контроля навесных вентилируемых фасадных систем объектов капитального строительства / Д. Ф. Карпов, М. В. Павлов, А. А. Синицын, Н. Н. Монаркин, А. Г. Гудков // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2020. Т. 47. № 1. С. 147-155. doi:10.21822/2073-6185-2020-47-1-147-155.
5. Будадин, О. Н. Тепловой контроль: учеб. пособие / О. Н. Будадин, В. П. Вавилов, Е. В. Абрамова. – Изд-е 2. – Москва: Издательский дом «Спектр». 2013. 176 с.
6. Karpov, D. Algorithm for integrated non-destructive diagnostics of technical condition of structures of buildings and constructions using the thermogram analysis / D. Karpov D, A. Sinitsyn // ICEPP-2020. E3S Web of Conferences. Vol. 161, 01040 (2020). doi.org/10.1051/e3sconf/202016101040.
7. Pavlov, M. Assessment of energy efficiency of application heat-insulating paint for the needs of district heat supply systems / M. Pavlov, D. Karpov, I. Akhmetova, N. Monarkin // HSTED-2020. E3S Web of Conferences 178, 01004 (2020). doi.org/10.1051/e3sconf/202017801004.
8. Karpov, D. Thermal method for non-destructive control of actual coolant mass flow through a heating device / D. Karpov D, A. Sinitsyn // ICEPP-2020. E3S Web of Conferences. Vol. 161, 01041 (2020). doi.org/10.1051/e3sconf/202016101041.
9. Vijayraghavan, G. K. NDTE using flash thermography: numerical modellling and analysis of delaminations in GRP pipes / G. K. Vijayraghavan, M. C. Majumder, K. P. Ramachandran // Insight. 2010. V. 52. No. 9. Pp. 481-487.
10. Карпов, Д. Ф. Обзор нормативных и руководящих документов по тепловизионному обследованию зданий и сооружений / Д. Ф. Карпов, М. В. Павлов, Е. Г. Касьянов, В. П. Никулин // Материалы VIII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием 22-23 ноября 2018 г. Часть 2. – Рубцовск: РИИ (филиал) ФГБОУ ВО «АГТУ им. И.И. Ползунова», 2018. С. 301-306.
11. Cramer, K. Status of Thermal NDT of Space Shuttle Materials at NASA / K. Cramer, W. Winfree, K. Hodges, A. Koshti, D. Ryan, W. Reinhardt // Proc. SPIE "Thermosense XXVIII". 2006. V. 6205. P. 6205 IB 1-9.
12. Karpov, D. Features and results of assessment the thermal conductivity of building materials and products by the active method of thermal non-destructive testing / D. Karpov, M. Pavlov, L. Mukhametova, A. A. Mikhin. // Sustainable Energy Systems: Innovative Perspectives (SES-2020). E3S Web of Conferences 220, 01053 (2020). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202022001053>.

13. George, S. Stress monitoring and analysis using lock-in thermography / S. George, S. Goravar, D. Mishra, M. T. Shyamsunder, P. Sharma, G. K. Padmashree, P. S. Kumar, P. Bremond, K. Mukherjee // *Insight*. 2010. V. 52. No. 9. pp. 470-474.
14. Karpov, D. Determination of surface temperature and moisture fields of structural elements of buildings by thermal imaging / D. Karpov, M. Pavlov, R. Salikhova // *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2021. Vol. 141. pp. 253-258. https://doi.org/10.1007/978-3-030-67654-4_28.
15. Tim Taylor, John Counsell, Steve Gill. Energy efficiency is more than skin deep: Improving construction quality control in new-build housing using thermography / *Energy and Buildings* 66 (2013) 222-231. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.07.051>.
16. Карпов, Д. Ф. Активный метод теплового контроля теплопроводности строительных материалов и изделий / Д. Ф. Карпов // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*, 2019. № 7. С. 57-62. doi:10.34031/article_5d35d0b79c34c5.75173950.
17. Теплообмен. Теория и практика: учебное наглядное пособие / М. В. Павлов, Д. Ф. Карпов, А. Г. Гудков и др. Вологда: ВоГУ, 2021. 84 с.
18. Карпов, Д. Ф. Применение активного и пассивного теплового контроля в дефектоскопии строительных материалов и изделий, ограждающих конструкций зданий и сооружений / Д. Ф. Карпов // *Строительные материалы и изделия*, 2019. Т. 2. № 4. С. 39-44.
19. Павлов, М. В. Современные теплоизоляционные материалы для повышения теплозащитных свойств ограждающих конструкций зданий и энергоэффективности инженерных систем / М. В. Павлов, Д. Ф. Карпов, В. П. Березина // *Научно-технические проблемы совершенствования и развития систем газоснабжения. Сборник научных трудов по материалам III Международной научно-практической конференции*. – Саратов: СГТУ им. Ю. А. Гагарина. 2020. С. 81-87.
20. Карпов, Д. Ф. О возможности применения тепловизионной съемки для контроля теплозащитных качеств ограждающих конструкций строительных объектов / Д.Ф. Карпов // XIX Международная молодежная научная конференция «Севергеоэкотех-2018»: материалы конференции (21-23 марта 2018 г.). В 5 ч. Ч. 4. Ухта: УГТУ, 2019. С. 111-113.
21. ГОСТ Р 54852-2011. Здания и сооружения. Метод тепловизионного контроля качества теплоизоляции ограждающих конструкций. Утв. и введ. в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 15 декабря 2011 г. № 1557-ст. Москва: Изд-во стандартов, 2012. 19 с.

References:

1. Okunev, A. YU. Sovremennye podhody k teplovizionnomu obsledovaniyu stroi-tel'nyh ob"ektov / A. YU. Okunev, E. V. Levin, K. S. SHaginyan // *ZHilishchnoe stroitel'stvo*. 2012. № 6. S. 7-9. [Okunev, A. Yu. Modern approaches to thermal imaging examination of construction objects / A. Yu. Okunev, E. V. Levin, K. S. Shaginyan // *Housing construction*. 2012. No. 6. pp. 7-9. (In Russ.)].
2. Karpov, D. F. Kompleksnaya energosberegayushchaya diagnostika tekhnicheskogo sostoyaniya ograzhdayushchih konstruktij ob"ektov kapital'nogo stroitel'stva i inzhenernyh sistem na osnove teplovogo kontrolya / D. F. Karpov, M. V. Pavlov, A. A. Sinicyn // *Nauchno-tekhnicheskij zhurnal «Energosberezhenie i vodopodgotovka»*. 2020. № 2 (124). S. 29-33. [Karpov, D. F. Integrated energy-saving diagnostics of the technical condition of fencing structures of capital construction objects and engineering systems based on thermal control / D. F. Karpov, M. V. Pavlov, A. A. Sinitsyn // *Scientific and technical journal "Energy saving and water treatment"*. 2020. No. 2 (124). pp. 29-33. (In Russ.)].
3. Vavilov, V. P. Teplovidenie i teplovoj kontrol' dlya inzhenerov / V. P. Vavilov. Izd. 1-e. Moskva: Izdatel'skij dom «SPEKTR». 2017. 72 s. [Vavilov, V. P. Thermal Imaging and thermal control for engineers / V. P. Vavilov. First edition. Moscow: Publishing house "SPECTRUM". 2017. 72 p. (In Russ.)].
4. Karpov, D. F. Nekotorye osobennosti i rezul'taty teplovogo kontrolya navesnyh ventiliruemym fasadnyh sistem ob"ektov kapital'nogo stroitel'stva / D. F. Karpov, M. V. Pavlov, A. A. Sinicyn, N. N. Monarkin, A. G. Gudkov // *Vestnik DGTU. Tekhnicheskie nauki*. 2020. T. 47. № 1 S. 147-155. [Karpov, D. F. Features of mounted ventilated facade heat control systems in construction projects / D. F. Karpov, M. V. Pavlov, A. A. Sinitsyn, N. N. Monarkin, A. G. Gudkov // *Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences*. 2020. Vol. 47. No. 1. pp. 147-155. (In Russ.)].
5. Budadin, O. N. Teplovoj kontrol': ucheb. posobie / O. N. Budadin, V. P. Vavilov, E. V. Abramova. – Edition 2. – Moskva: Izdatel'skij dom «Spektr». 2013. 176 s. [Budadin, O. N. Thermal control: textbook for universities / O. N. Budadin, V. P. Vavilov, E. V. Abramova. Edition 2. Moscow: Publishing House "SPECTRUM". 2013. 176 p. (In Russ.)].
6. Karpov, D. Algorithm for integrated non-destructive diagnostics of technical condition of structures of buildings and constructions using the thermogram analysis / D. Karpov D, A. Sinitsyn // *ICEPP-2020. E3S Web of Conferences*. Vol. 161, 01040 (2020). doi.org/10.1051/e3sconf/202016101040.
7. Pavlov, M. Assessment of energy efficiency of application heat-insulating paint for the needs of district heat supply systems / M. Pavlov, D. Karpov, I. Akhmetova, N. Monarkin // *HSTED-2020. E3S Web of Conferences* 178, 01004 (2020). doi.org/10.1051/e3sconf/202017801004.
8. Karpov, D. Thermal method for non-destructive control of actual coolant mass flow through a heating device / D. Karpov D, A. Sinitsyn // *ICEPP-2020. E3S Web of Conferences*. Vol. 161, 01041 (2020). doi.org/10.1051/e3sconf/202016101041.

9. Vijayraghavan, G. K. NDTE using flash thermography: numerical modelling and analysis of delaminations in GRP pipes / G. K. Vijayraghavan, M. C. Majumder, K. P. Ramachandran // *Insight*. 2010. V. 52. No. 9. Pp. 481-487.
10. Karpov, D. F. Obzor normativnyh i rukovodyashchih dokumentov po teplovizionnomu obsledovaniyu zdaniy i sooruzhenij / D. F. Karpov, M. V. Pavlov, E. G. Kas'yanov, V. P. Nikulin // *Materialy VIII Vserossiyskoj nauchno-prakticheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem 22-23 noyabrya 2018 g. CHast' 2. Rubcovsk: RII (filial) FGBOU VO «AGTU im. I.I. Polzunova»*, 2018. S. 301-306. [Review of regulatory and guidance documents for thermal imaging inspection of buildings and structures / D. F. Karpov, M. V. Pavlov, E. G. Kasyanov, V. P. Nikulin // *Materials VIII all-Russian scientific and practical conference with international participation 22-23 November 2018. Part 2. – Rubtsovsk: RII (branch) of the Federal state budgetary educational institution of higher education "Altai state technical University. I. I. Polzunova»*. 2018. pp. 301-306. (In Russ.)].
11. Cramer, K. Status of Thermal NDT of Space Shuttle Materials at NASA / K. Cramer, W. Winfree, K. Hodges, A. Koshti, D. Ryan, W. Reinhardt // *Proc. SPIE "Thermosense XXVIII"*. 2006. V. 6205. P. 6205 IB 1-9.
12. Karpov, D. Features and results of assessment the thermal conductivity of building materials and products by the active method of thermal non-destructive testing / D. Karpov, M. Pavlov, L. Mukhametova, A. A. Mikhin. // *Sustainable Energy Systems: Innovative Perspectives (SES-2020)*. E3S Web of Conferences 220, 01053 (2020). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202022001053>.
13. George, S. Stress monitoring and analysis using lock-in thermography / S. George, S. Goravar, D. Mishra, M. T. Shyamsunder, P. Sharma, G. K. Padmashree, P. S. Kumar, P. Bremond, K. Mukherjee // *Insight*. 2010. V. 52. No. 9. Pp. 470-474.
14. Karpov, D. Determination of surface temperature and moisture fields of structural elements of buildings by thermal imaging / D. Karpov, M. Pavlov, R. Salikhova // *Lecture Notes in Civil Engineering*. – 2021. – Vol. 141. – Pp. 253-258. https://doi.org/10.1007/978-3-030-67654-4_28.
15. Tim Taylor, John Counsell, Steve Gill. Energy efficiency is more than skin deep: Improving construction quality control in new-build housing using thermography / *Energy and Buildings* 66 (2013) 222-231. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.07.051>.
16. Karpov, D. F. Aktivnyj metod teplovogo kontrolya teploprovodnosti stroitel'nyh materialov i izdelij / D. F. Karpov // *Vestnik BG TU im. V.G. SHuhova*, 2019. № 7. S. 57-62. [Karpov, D. F. The active method of control the thermal conductivity of building materials and products / D. F. Karpov // *Bulletin of BSTU named after V. G. Shukhov*, 2019. No. 7. pp. 57-62. (In Russ.)].
17. Teploobmen. Teoriya i praktika: uchebnoe naglyadnoe posobie / M. V. Pavlov, D. F. Karpov, A. G. Gudkov i dr. – Vologda: VoGU, 2021. – 84 s. [Heat transfer. Theory and practice: illustrated study guide / M. V. Pavlov, D. F. Karpov, A. G. Gudkov and other; Ministry of science and higher education of the Russian Federation, Vologda state university. – Vologda, VoSU, 2021. 84 p. (In Russ.)].
18. Karpov, D. F. Primenenie aktivnogo i passivnogo teplovogo kontrolya v defektoskopii stroitel'nyh materialov i izdelij, ograzhdayushchih konstrukcij zdaniy i sooruzhenij / D. F. Karpov // *Stroitel'nye materialy i izdeliya*, 2019. T. 2. № 4. S. 39-44. [Karpov, D. F. Application of active and passive thermal control in defectoscopy of construction materials and products, filler structures of buildings and constructions / D. F. Karpov // *Construction Materials and Products*. 2019. Volume 2. Issue 4. pp. 39-44. (In Russ.)].
19. Pavlov, M. V. Sovremennye teploizolyacionnye materialy dlya povysheniya teplozashchitnyh svoystv ograzhdayushchih konstrukcij zdaniy i energoeffektivnosti inzhenernyh sistem / M. V. Pavlov, D. F. Karpov, V. P. Berezina // *Nauchno-tehnicheskie problemy sovershenstvovaniya i razvitiya sistem gazoenergосnabzheniya. Sbornik nauchnyh trudov po materialam III Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii*. – Saratov: SGTU im. YU. A. Gagarina. – 2020. – S. 81-87. [Pavlov, M. V. Modern thermal insulation materials for improving the thermal protection properties of building structures and energy efficiency of engineering systems / M. V. Pavlov, D. F. Karpov, V. P. Berezina // *Scientific and technical problems of improvement and development of gas power supply systems. Collection of scientific works on the materials of the III International Scientific and Practical Conference*. – Saratov: SSTU named after Yu. A. Gagarin. – 2020. pp. 81-87. (In Russ.)].
20. Karpov, D. F. O vozmozhnosti primeneniya teplovizionnoj s"emki dlya kontrolya teplozashchitnyh kachestv ograzhdayushchih konstrukcij stroitel'nyh ob"ektov / D.F. Karpov // *XIX Mezhdunarodnaya molodezhnaya nauchnaya konferenciya «Severgeotekh-2018»: materialy konferencii (21-23 marta 2018 g.)*. V 5 ch. CH. 4. Uhta: UGTU, 2019. S. 111-113. [Karpov, D. F. About the possibility of using thermal imaging for monitoring thermal qualities of the walling of construction projects / D. F. Karpov // *XIX International youth scientific conference "Severgeoteh-2018": materials of the conference (21-23 March 2018)*. In 5 parts. Part 4. Ukhta: Ukhta State Technical University, 2019. pp. 111-113. (In Russ.)].
21. GOST R 54852-2011. Zdaniya i sooruzheniya. Metod teplovizionnogo kontrolya kachestva teploizolyacii ograzhdayushchih konstrukcij. Utv. i vved. v dejstvie Priказом Federal'nogo agentstva po tekhnicheskому regulirovaniyu i metrologii ot 15 dekabrya 2011 g. № 1557-st. Moskva: Izd-vo standartov, 2012. 19 s. [State Standard R 54852-2011. Buildings and structures. Thermal imaging quality control method for thermal insulation of enclosing structures. - Approved and put into effect by the Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated December 15, 2011 No. 1557-st. Moscow: Standards Publishing House, 2012. 19 p. (In Russ.)].

Сведения об авторах:

Карпов Денис Федорович, старший преподаватель; e-mail: karpov_denis_85@mail.ru

Павлов Михаил Васильевич, кандидат технических наук, старший преподаватель; e-mail: pavlov_kaftgv@mail.ru

Information about authors:

Denis. F. Karpov, Senior Lecturer; e-mail: karpov_denis_85@mail.ru

Mikhail V. Pavlov, Cand. Sci. (Technical), Senior Lecturer; e-mail: pavlov_kaftgv@mail.ru

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 25.04.2021.

Принята в печать 19.05.2021.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 25.04.2021.

Accepted for publication 19.05.2021.

Для цитирования: А.А.Крутилин, Т.В. Крпачетова, Н.А. Инькова, О.К.Пахомова. Исследование физико-химических процессов, сопровождающих коррозию цементов («слёживание») во влажном воздухе, содержащем углекислоту. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2021; 48(2):103-112. DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-2-103-112

For citation: A. A. Krutilin, T. V. Krapchetova, N.A. Inkova, O. K. Pakhomova. Research of physical and chemical processes associated with corrosion of cements ("Caking") in dampy wet air. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2021; 48(2):103-112. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-2-103-112

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 691.542

DOI: 10.21822/2073-6185-2021-48-2-103-112

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, СОПРОВОЖДАЮЩИХ КОРРОЗИЮ ЦЕМЕНТОВ («СЛЁЖИВАНИЕ») ВО ВЛАЖНОМ ВОЗДУХЕ, СОДЕРЖАЩЕМ УГЛЕКИСЛОТУ

¹А.А.Крутилин, ²Т.В. Крпачетова, ¹Н.А. Инькова, ¹О.К.Пахомова

¹Волгоградский государственный технический университет (Себряковский филиал),

¹403343, Волгоградская обл., г. Михайловка, ул. Мичурина, 21, Россия

²АО «Себряковцемент»,

²403343, Волгоградская обл., г. Михайловка, ул. Индустриальная 2, Россия

Резюме. Целью работы является изучение механизма и кинетики процессов, приводящих к слёживанию цементов. **Метод.** Для определения фазового состава использовались современные физико-химические методы: РФА, дериватография и электронная микроскопия. **Результат.** Полученные данные показывают, что «лежалость» цемента при его вынужденном хранении во влажном воздухе через адсорбцию паров воды, а затем и CO₂ связана с процессами гидролиза, гидратации в поверхностных слоях частиц, в первую очередь, для наиболее реакционно способных минералов портландцементного клинкера. Углубление этих процессов зависит и от состояния корродированной поверхности минералов. **Вывод.** В результате проведённой работы можно предварительно определить условия хранения свежемолотых портландцементов (по кинетике сорбции – продолжительность хранения, по изотермам – допустимую относительную влажность), при которых величина п.п.п. товарного цемента остается стабильной в необходимое минимальное время.

Ключевые слова: механизм и кинетика процессов, фазовый состав, физико-химические методы, дериватография, электронная микроскопия, сорбция

RESEARCH OF PHYSICAL AND CHEMICAL PROCESSES ASSOCIATED WITH CORROSION OF CEMENTS ("CAKING") IN DAMPY WET AIR

¹A. A. Krutilin, ²T. V. Krapchetova, ¹N. A. Inkova, ¹O. K. Pakhomova

¹Volgograd State Technical University (Sebryakov Branch),

¹21 Michurina Str., Volgograd region, Mikhailovka 403343, Russia

²Sebryakovtsement JSC,

²2 Industrial'naya Str., Volgograd region, Mikhailovka 403343, Russia

Abstract. Objective. The paper is aimed at clarifying the mechanism and kinetics of the processes leading to cement caking. **Methods.** To determine phase composition, the following modern physical and chemical methods were used: XRF, derivatography and electron microscopy. **Results.** The data obtained show that the "aging" of cements during their forced storage in humid air through the adsorption of water vapor, and then CO₂, is associated with the processes of hydrolysis, hydration in surface layers of particles, is primarily relevant for the most reactive minerals of Portland cement clinker. The deepening of these processes also depends on the state of the corroded surface of miner-

als. **Conclusion.** The work carried out makes it is possible to preliminarily outline storage conditions for freshly ground Portland cements (according to the kinetics of sorption – the storage duration, according to isotherms – the permissible relative humidity), at which the LOI value of commercial cement remains stable for the required minimum time.

Keywords: mechanism and kinetics of processes, phase composition, physical and chemical methods, derivatography, electron microscopy, sorption

Введение. Выпускаемые промышленностью портландцементы сразу после помола имеют величину п.п.п. порядка 1%. При транспортировке и хранении портландцементов, особенно в неблагоприятных условиях континентального климата – величина п.п.п. возрастает. Как известно, «слёживание» цемента резко усиливается в случаях выпуска «горячих» цементов. В результате в строительстве имеют дело с «лежалыми» цементами, в некоторой степени, утратившими свою гидравлическую активность, в то время как материал для строительных работ должен быть свежим. Использование его максимальных потенциальных возможностей имеет большое принципиальное и экономическое значение. Этому чрезвычайно важному вопросу до сего времени уделяется незаслуженно мало внимания.

Постановка задачи. Целью работы было изучение механизма и кинетики процессов, приводящих к слёживанию цементов, а также раскрытие роли отдельных минералов, особенностей этих процессов во времени и в условиях различной относительной влажности воздуха.

Методы исследования. Кинетику и изотермы сорбции изучали гравиметрическим методом при температуре 20-22⁰С. Бюксы с навесками клинкерных минералов – алит C₃S, белит β-C₂S, алюминат C₃A, алюмоферрит C₄AF, а так же свежемолотого портландцемента, помещали в эксикаторы, где поддерживалась различная относительная влажность воздуха с помощью следующих гигростатов (табл. 1).

Таблица 1. Относительная влажность воздуха с гигростатами

Table 1. Relative humidity with hygrostats

Относительная влажность, % Relative humidity, %	99	95	86	75	63	55	44	32
Насыщенные растворы солей Saturated salt solutions	$Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$	KNO_3	KCl	$NaCl$	NH_4NO_3	$Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$	$K_2CO_3 \cdot 2H_2O$	$CaCl_2 \cdot 6H_2O$

Содержание CO₂ в эксикаторах и в атмосфере лаборатории было обычным и относительно постоянным. Помол портландцементного клинкера проводили в лабораторной мельнице с особыми предосторожностями: мельница была предварительно высушена, было выбрано жаркое время года, а после помола цемент был тщательно изолирован от воздействия паров воды и CO₂.

Минералогический состав цемента определялся рентгенофазовым методом РФА на дифрактометре ARL X'TRA: C₃S – 58,7%, белит βC₂S – 20,7%, алюминат C₃A – 6,8%, алюмоферрит C₄AF – 12,1%, SO₃ – 3,0%.

Величина п.п.п. после помола составляла 1,53%, что приблизительно соответствует содержанию кристаллизационной воды во введённом при помоле гипсовом камне. Навески цементов по 0,3 г были распределены тонким слоем по дну бюксов, которые хранились в эксикаторах и через различное время взвешивались на аналитических весах. Для определения фазового состава использовались современные физико-химические методы: РФА, дериватография и электронная микроскопия.

На кривых кинетики суммарной сорбции H₂O и CO₂ для непрокалённого алита с удельной поверхностью 4100 см²/г (по ПСХ-12) наблюдается изменение скорости сорбции на раз-

личных стадиях процесса (рис.1): от 1 до 7 суток идёт нарастание скорости сорбции, от 7 до 20 суток при различных относительных влажностях она снижается.

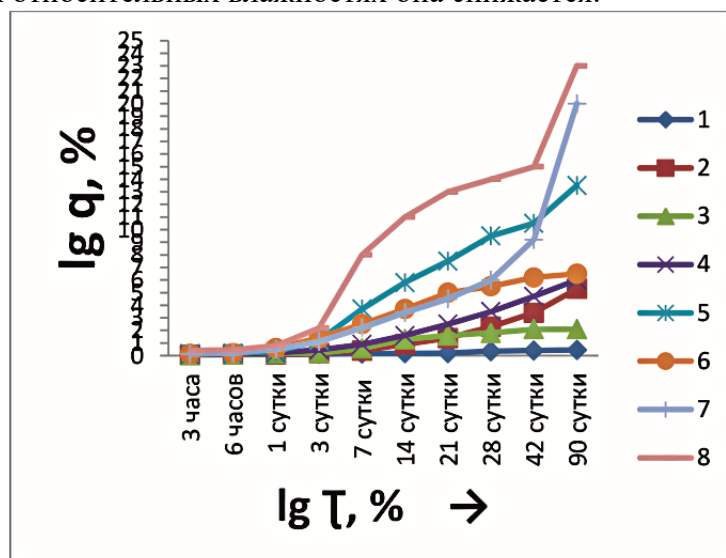


Рис. 1. Кинетика сорбции для непрокаленного C_3S ($S_1 = 4100 \text{ см}^2/\text{г}$, п.п.п. = 0,64%) при различных ϕ (%): 1 – 32; 2 – 44; 3 – 55; 4 – 63; 5 – 75; 6 – 86; 7 – 96; 8 – 99

Fig. 1. Kinetics of sorption for uncalcined C_3S ($S_1 = 4100 \text{ cm}^2/\text{g}$, pp = 0.64%) at different ϕ (%): 1 - 32; 2 - 44; 3 - 55; 4 - 63; 5 - 75; 6 - 86; 7 - 96; 8 - 99

Кинетические кривые имеют чёткий S-образный вид. Скорости сорбции для прокалённого алита C_3S (рис.2) при различных изученных относительных влажностях мало отличаются от непрокалённого алита. Что свидетельствует о несущественном влиянии степени коррозии поверхности при малых величинах п.п.п. (1%) на сорбционную способность, в частности при относительной влажности 75% и более.

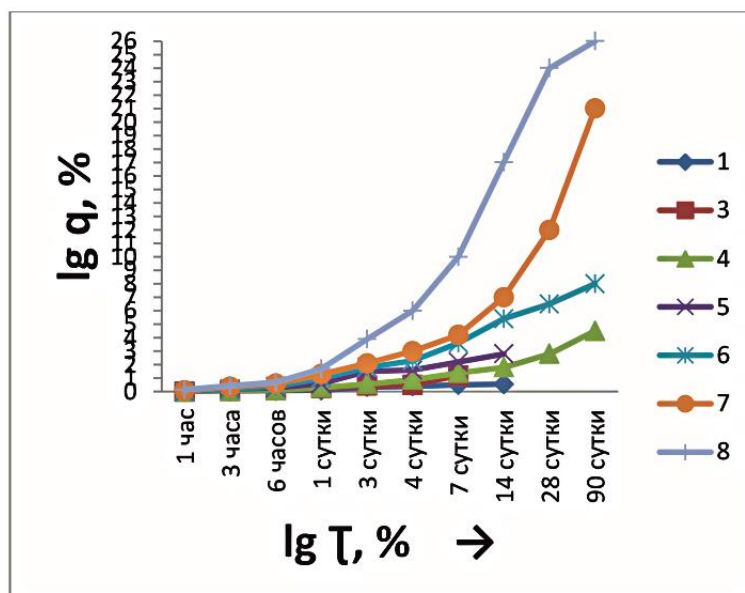


Рис. 2. Кинетика сорбции для свежепрокаленного при 800 – 900 °C C_3S ($S_1 = 4100 \text{ см}^2/\text{г}$) при различных ϕ (%): 1 – 32; 3 – 55; 4 – 63; 5 – 75; 6 – 86; 7 – 96; 8 – 99

Fig. 2. Kinetics of sorption for freshly calcined at 800 - 900 °C C_3S ($S_1 = 4100 \text{ cm}^2/\text{g}$) at different ϕ (%): 1 - 32; 3 - 55; 4 - 63; 5 - 75; 6 - 86; 7 - 96; 8 - 99

Уменьшение тонкости помола алита мало влияет на общий характер кинетических кривых, но, естественно, несколько уменьшает величину сорбции (%), особенно при низких значениях относительной влажности. Величина сорбции для трёхкальцевого алюмината (рис.3) через 90 суток при относительной влажности 88% примерно в 3 раза выше, чем у алита при практически равной удельной поверхности исходных материалов. При относительной влажности

75% и ниже величины сорбции для C_3S и C_3A близки. Кинетические кривые для C_3A так же имеют S-образный вид.

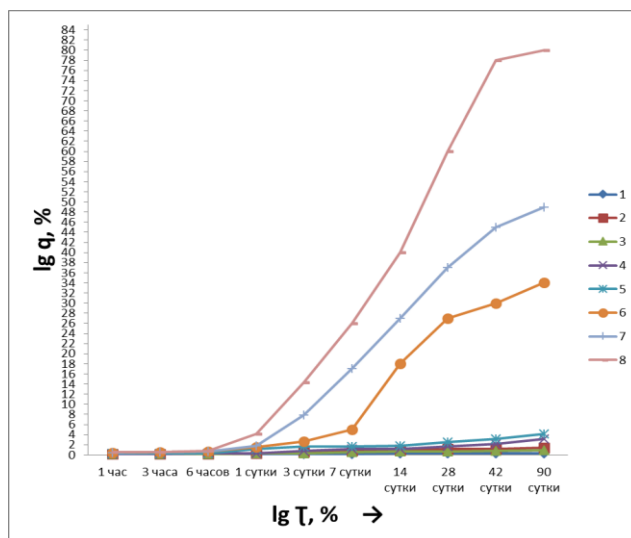


Рис. 3. Кинетика сорбции для прокаленного C_3A ($S_1 = 4050 \text{ cm}^2/\text{г}$) при различных ϕ (%): 1 – 32; 2 – 44; 3 – 55; 4 – 63, 5 – 75; 6 – 86; 7 – 96; 8 – 99

Fig.3. Kinetics of sorption for calcined C_3A ($S_1 = 4050 \text{ cm}^2/\text{g}$) at different ϕ (%): 1 - 32; 2 - 44; 3 - 55; 4 - 63, 5 - 75; 6 - 86; 7 - 96; 8 - 99

В первые часы сорбции для C_4AF (удельная поверхность $2500 \text{ cm}^2/\text{г}$) в 2,5-3 раза меньше (рис.4), чем для алюмината с удельной поверхностью $4000 \text{ cm}^2/\text{г}$, что объясняется более грубой дисперсностью алюмоферрита.

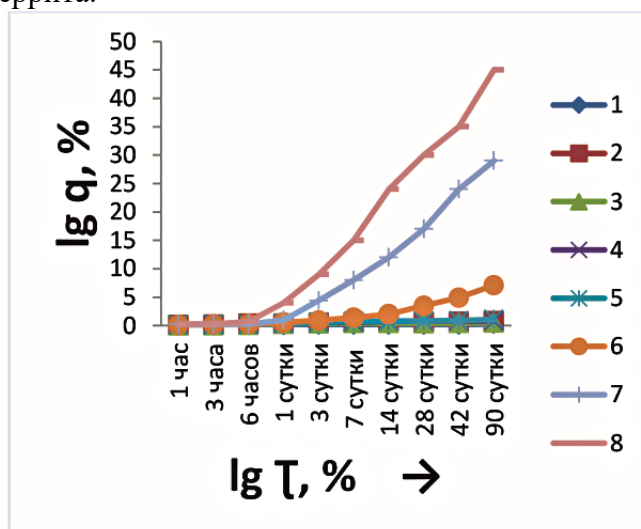


Рис. 4. Кинетика сорбции для непрокаленного C_4AF ($S_1 = 2560 \text{ cm}^2/\text{г}$) при различных ϕ (%): 1 – 32; 2 – 44; 3 – 55; 4 – 63, 5 – 75; 6 – 86; 7 – 96; 8 – 99

Fig. 4. Kinetics of sorption for uncalcined C_4AF ($S_1 = 2560 \text{ cm}^2/\text{g}$) at different ϕ (%): 1 - 32; 2 - 44; 3 - 55; 4 - 63, 5 - 75; 6 - 86; 7 - 96; 8 - 99

После 6 часов величины сорбции для алюмината и алюмоферрита сближаются и при относительной влажности 95% через 1 сутки примерно в три раза превышают сорбционную способность алита. Для алюминатных минералов и портландцемента (рис.5) характерны также весьма существенные различия в величинах сорбции и разных областях относительной влажности: равной либо меньше 75% или более 75%.

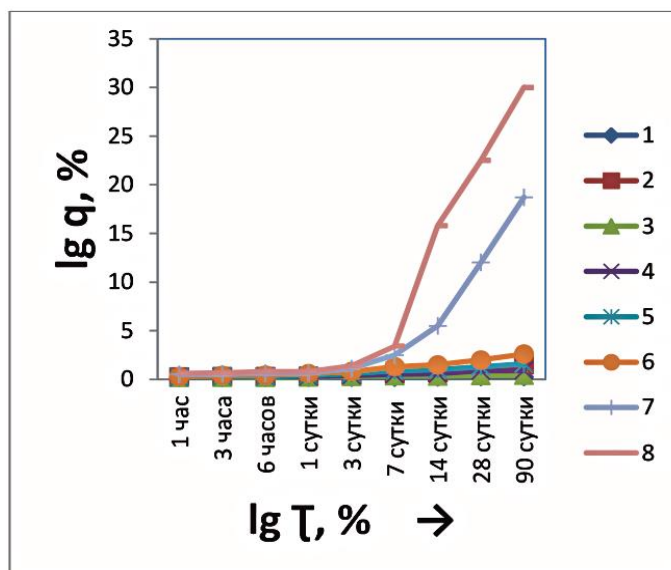


Рис.5. Кинетика сорбции для свежемолотого портландцемента ($S_1 = 4500 \text{ cm}^2/\text{г}$) при различных ϕ (%): 1 – 32; 2 – 44; 3 – 55; 4 – 63, 5 – 75; 6 – 86; 7 – 96; 8 – 99

Fig. 5. Kinetics of sorption for freshly ground Portland cement ($S_1 = 4500 \text{ cm}^2/\text{g}$) at different ϕ (%): 1 – 32; 2 – 44; 3 – 55; 4 – 63, 5 – 75; 6 – 86; 7 – 96; 8 – 99

По своей сорбционной способности по отношению к парам воды и CO_2 β -C2S резко отличается от других исследованных минералов (табл.2) при относительной влажности менее 55% поглощение влаги практически не происходит вплоть до 3-х месяцев, а при влажности 99% сорбция становится заметной только через 24 часа.

Таблица 2. Увеличение массы (сорбции, %) у свежепрокалённого при 800-900°C β -C2S (удельная поверхность $3000 \text{ cm}^2/\text{г}$)

Table 2. Increase in mass (sorption, %) in freshly calcined at 800-900°C β -C2S (specific surface area $3000 \text{ cm}^2/\text{g}$)

Относительная влажность, % Relative humidity, %	Время выдерживания во влажных условиях, сут. Holding time in humid conditions, days							
	1	4	7	14	21	28	42	90
32	0	0	0	0	0	0	0	0
44	0	0	0	0	0	0	0	0
55	0	0	0,30	0,33	0,23	0,23	0,33	0,48
63	0	0	0,10	0,10	-	-	-	-
75	0	0	0,20	0,33	0,20	0,29	-	-
86	0	0	0,20	0,20	0,07	-	0,33	0,44
95	0	0	0,13	0,26	-	-	-	-
99	0,34	0,55	0,45	0,89	0,33	0,27	0,86	0,79

Как видно, сорбция для β -C2S очень мала и не может быть определена достаточно точно вследствие малой величины взятых навесок (по 0,3г). Кроме того, агрегирование частиц β -C2S может вносить некоторые изменения в процесс сорбции. По этим причинам для получения низких величин сорбции белита наблюдается разброс их значений. Однако, и при этих условиях изотермы сорбции для β -C2S имеют тот же характер, что и для других минералов. Следует отметить, что для алита (удельная поверхность $4100 \text{ cm}^2/\text{г}$ и $2800 \text{ cm}^2/\text{г}$) при относительной влажности равной либо менее 63% сорбция паров воды практически отсутствует в течении первых 6 часов, но за сутки достигает 1%.

По величинам сорбции свежемолотый портландцемент близок к алиту с удельной поверхностью $4100 \text{ cm}^2/\text{г}$. Но интервал относительной влажности, соответствующий наличию плато на изотермах сорбции для портландцемента – шире (рис.6). Это может быть связано с наличием в нём минерала C_4AF (рис.10).

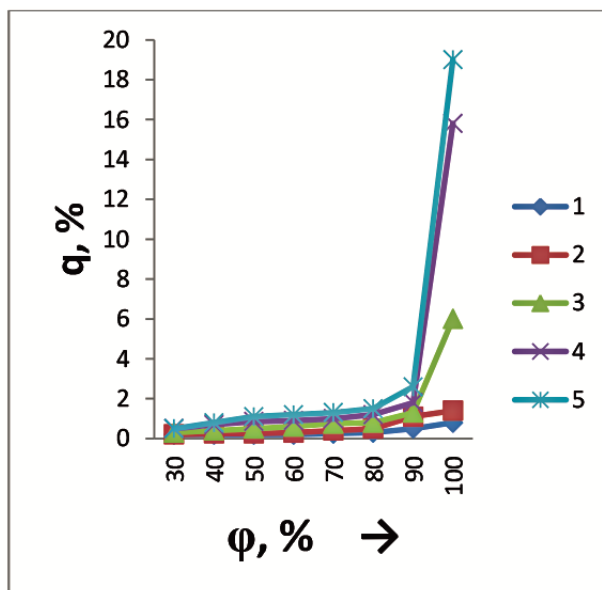


Рис. 6. Изотермы сорбции при 21 ± 1 °C для свежемолотого портландцемента ($S_1 = 4500 \text{ см}^2/\text{г}$)
 Fig. 6. Sorption isotherms at 21 ± 1 °C for freshly ground Portland cement ($S_1 = 4500 \text{ см}^2/\text{г}$)

Следует учитывать, что наряду с адсорбцией паров воды твёрдой поверхностью цементов с образованием мономолекулярного слоя, в порах между частицами происходит так же капиллярная конденсация паров воды после образования там менисков жидкости и тем интенсивнее, чем выше относительная влажность. Область плато на изотермах сорбции, очевидно, соответствует образованию монослоя; резкий подъем кривых при относительной влажности более 75% связан с образованием полимолекулярных слоёв и капиллярной конденсацией. У «лежалого» алита свободная вода появляется при сорбции 1,3%, а при сорбции 2,7% свободная вода уже имеется в количестве 0,3%.

Следовательно, цемент, хранящийся длительное время при высокой влажности, находится в условиях, когда наиболее вероятны процессы его поверхностной гидратации и гидролиза с образованием малорастворимых, обычных для этих процессов продуктов – гидратов в виде тонких плёнок на поверхности исходных частиц мономинералов.

В случае алита после образования плёнок жидкой воды между частицами мономинерального цемента происходит его растворение и гидролиз с образованием насыщенного (и пересыщенного) раствора извести; последний, как известно, является хорошим поглотителем CO_2 . Вследствие поглощения CO_2 из воздуха при хранении цемента происходит карбонизация возникших продуктов гидратации и гидролиза с образованием CaCO_3 в качестве вторичного продукта.

Таким образом, в случае алита сначала сорбируется преимущественно вода, а в дальнейшем так же и CO_2 . Различие в характере и интенсивности сорбции паров воды и разных областях относительной влажности и через различное время находит отражение в форме изотерм сорбции.

Для алита с удельной поверхностью $4100 \text{ см}^2/\text{г}$ (рис.7) в течении первых 8-14 суток пребывания во влажном воздухе характерно наличие отчётливого плато на изотермах сорбции в области относительной влажности 45-75%, которая со временем исчезает вследствие поглощения CO_2 . Величина сорбции этой части S-образных изотерм изменяется мало или практически остается постоянной и составляет 1-1,5% в период менее 16 суток. Это может быть связано с образованием адсорбционных слоёв воды определённой толщины.

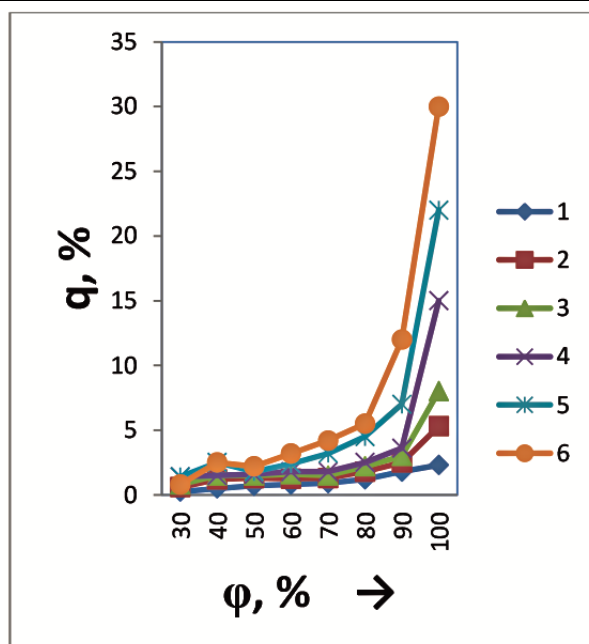


Рис.7. Изотермы сорбции при 21 ± 1 °C для свеженепрокаленного при 900 – 1000 °C C_3S ($S_1 = 4100$ cm^2/g)

Fig. 7. Sorption isotherms at 21 ± 1 °C for freshly calcined at 900 - 1000 °C C_3S ($S_1 = 4100$ cm^2/g)

В полимолекулярных адсорбционных слоях воды и особенно при относительной влажности 75-80% интенсивно развивается капиллярная конденсация и происходит растворение поверхностных слоёв частиц минералов, что приводит к образованию соответствующих гидратов. Это подтверждается данными дериватографических исследований (рис.8). наиболее интенсивно с ростом значения сорбции для алита возрастает содержание $CaCO_3$ и гидросиликатов кальция.

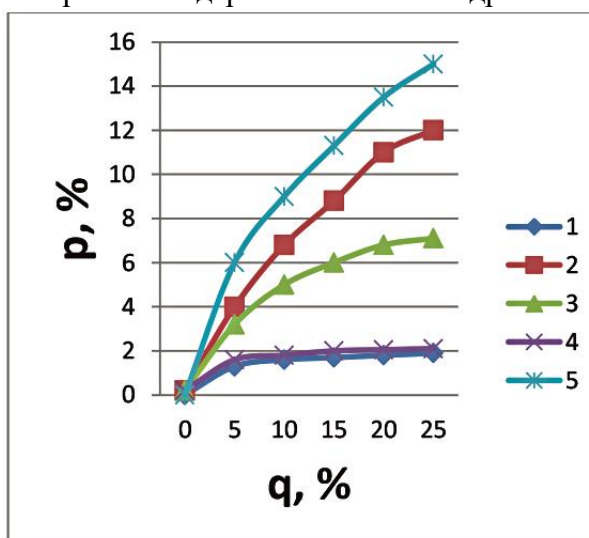


Рис. 8. Зависимость содержания (p,%) свободной воды (1), воды в составе гидроксида кальция (2), CO_2 (3), $Ca(OH)_2$ (4) и $CaCO_3$ (5) от общей величины сорбции (q, %) алита после его выдерживания во влажном воздухе (по данным дериватографии)

Fig. 8. Dependence of the content (p,%) of free water (1), water in the composition of calcium hydroxide (2), CO_2 (3), $Ca(OH)_2$ (4) and $CaCO_3$ (5) on the total sorption value (q, %) alite after keeping in humid air (according to derivatography data)

Из цементов из C_3A (рис.9) в области относительной влажности 45-70% на изотермах сорбции так же наблюдается отчётливое плато, которое, однако, в отличие от алита сохраняется вплоть до 28 суток, т.к. очевидно в этом случае не имеет места интенсивное поглощение CO_2 из воздуха на этот период.

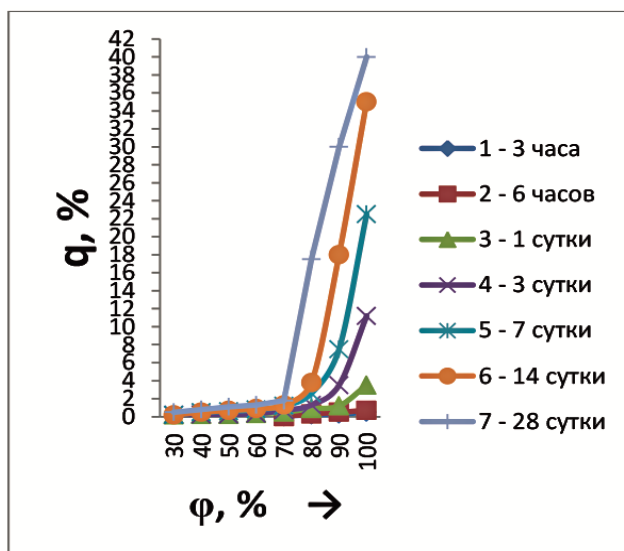


Рис. 9. Изотермы сорбции при 21 ± 1 °C для непрокаленного C_3A ($S_1 = 4050 \text{ см}^2/\text{г}$)

Fig. 9. Sorption isotherms at 21 ± 1 °C for uncalcined C_3A ($S_1 = 4050 \text{ см}^2/\text{г}$)

Аналогичная картина наблюдается для цемента из C_4AF (рис.10) и портландцемента (рис.6) до 28 суток. Очевидно, в последнем случае исчезновение плато и более крутой подъём изотерм сорбции будут иметь место позже и в менее интенсивной степени, чем для минерала алита.

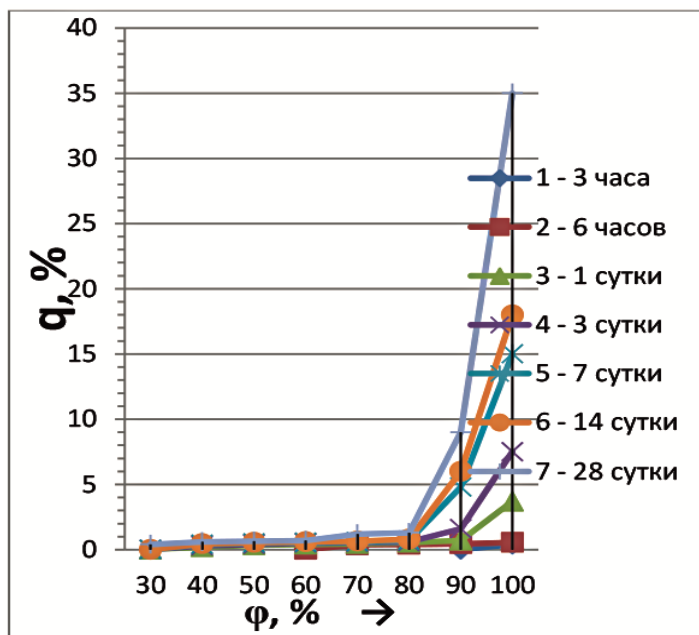


Рис. 10. Изотермы сорбции при 21 ± 1 °C для непрокаленного C_4AF ($S_1 = 2560 \text{ см}^2/\text{г}$)

Fig. 10. Sorption isotherms at 21 ± 1 °C for uncalcined C_4AF ($S_1 = 2560 \text{ см}^2/\text{г}$)

Обсуждение результатов. Различный характер изотерм сорбции для алита и алюминатных минералов на поздних стадиях процесса и в наших опытах показывает разную химическую природу минералов и принципиально разный ход процессов взаимодействия их с водой. В первом случае гидратация сопровождается гидролизом, интенсивным накоплением извести с образованием её насыщенных растворов, активно поглощающих CO_2 . Во втором случае CO_2 связано, главным образом, с его химическим взаимодействием с гидратами и образованием гидрокарбоалюмината кальция, а затем его постоянным разложением. Полученные данные показывают, что «лежалость» цемента при их вынужденном хранении во влажном воздухе через адсорбцию паров воды, а затем и CO_2 связана с процессами гидролиза, гидратации в поверхностных слоях частиц, в первую очередь для наиболее реакционно способных минералов портланд-

цементного клинкера. Углубление этих процессов зависит и от состояния корродированной поверхности минералов. Комкование, по-видимому, происходит в результате связывания – «цементации» отдельных частиц цемента кристаллическими продуктами гидратации и гидролиза минералов цемента, а так же вторичными продуктами карбонизации гидратов.

Вывод. В результате проведенной работы можно предварительно наметить условия хранения свежемолотых портландцементов (по кинетике сорбции – продолжительность хранения, по изотермам – допустимую относительную влажность), при которых величина п.п.п. товарного цемента остается стабильной необходимое минимальное время.

Цемент при +20⁰С следует изолировать от воздействия влаги при относительной влажности 75% и более. Коррозия цемента зависит от его минералогического состава. Минералы портландцемента обладают резко различной сорбционной способностью. Тонкость помола исследованных цементов в изученных пределах 2800-4100 см²/г мало влияет на величины их сорбции. «Лежалые» цементы твердеют при затворении, но этим процессам мешают возникшие коррозионные плёнки. Структура цементного камня на «лежалом» цементе будет иметь другие физические характеристики, что многократно наблюдалось практически.

Библиографический список:

1. Андреева А.В., Буренина О.Н., Давыдова Н.Н., Даваасенгэ С.С., Саввинова М.Е. Повышение эффективности залежалого цемента путем механоактивации. Города России: проблемы строительства, инженерного обеспечения, благоустройства и экологии. XVII Международная научно-практическая конференция: сборник статей. Редактор: В. А. Селезнев, И. А. Лушкин. 2015. С. 15-19.
2. Головизнина Т.Е. Влияние длительного хранения на свойства цементов. В сборнике: Наукоемкие технологии и инновации. Сб. докл. межд. научно-практической конференции. 2016. С. 70-74.
3. Ильина Л.В. Повышение прочностных характеристик цементных композитов на основе цемента длительного хранения. Фундаментальные исследования. 2011. № 12 (часть 1). С. 112-116.
4. Классен В.К., Михин А.С. Анализ изменения активности клинкера на ОАО "Себряковцемент". Фундаментальные исследования. 2006. № 2. С. 63.
5. Козлова В.К., Григорьев В.Г., Малова Е.Ю., Божок Е.В., Мануйлов Е.В. Сравнительные результаты определения фазового состава и микроструктуры клинкеров методами физико-химического анализа. Цемент и его применение. 2013. № 3. С. 34-38.
6. Лотов В.А. Изменение фазового состава системы цемент-вода при гидратации и твердении. Известия Томского политехнического университета. 2012. Т. 321. № 3. С. 42-45.
7. Назимов С.А., Чиркин Д.Б. Определение показателей качества цемента при помощи автоматических анализаторов. Цемент и его применение. 2017. № 2. С. 63-65.
8. Саввинова М.Е. Исследование прочности образцов из залежалого цемента. В сборнике: Перспективные научные исследования: опыт, проблемы и перспективы развития. Сборник статей по материалам международной научно-практической конференции. 2019. С. 48-51.
9. Тутов Е.А., Голощапов Д.Л., Гребенкин С.Д., Артамонова О.В. Сорбция паров воды на поверхностно-модифицированном портландцементе. В сборнике: Физико-химические основы ионообменных и хроматографических процессов - "Иониты-2017". Материалы XV Международной научно-практической конференции, посвященной 115-летию открытия хроматографии и 100-летию Воронежского государственного университета. Редактор: В.Ф. Селеменев. 2017. С. 318-320.
10. Чулкова И.Л., Галдина В.Д. Влияние состава жидкой фазы на процесс твердения цементов. Промышленное и гражданское строительство. 2019. № 12. С. 48-54.

References:

1. Andreyeva A.V., Burenina O.N., Davydova N.N., Davaasenge S.S., Savvinova M.Ye. Povysheniye effektivnosti zalezhalogo tsementa putem mekhanoaktivatsii. [Andreeva A.V., Burenina O.N., Davydova N.N., Davaasenge S.S., Savvinova M.E. Increasing the efficiency of stale cement by mechanical activation. In the collection: Cities of Russia: problems of construction, engineering, improvement and ecology. XVII International Scientific and Practical Conference: collection of articles. editor: V. A. Seleznev, I. A. Lushkin. 2015.pp. 15-19. (In Russ)]
2. Goloviznina T.Ye. Vliyaniye dlitel'nogo khraneniya na svoystva tsementov. V sbornike: Naukoyemkiye tekhnologii i innovatsii. Sbornik dokladov mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Goloviznina T.E. The influence of long-term storage on the properties of cements. In the collection: Science-intensive technologies and innovations. Collection of reports of the international scientific and practical conference. 2016. pp. 70-74. (In Russ)]
3. Il'ina L.V. Povysheniye prochnostnykh kharakteristik tsementnykh kompozitov na osnove tsementa dlitel'nogo khraneniya. Fundamental'nyye issledovaniya [Ilyina L.V. Improving the strength characteristics of cement composites based on long-term storage cement. Basic research. 2011. No. 12 (part 1). pp. 112-116. (In Russ)]

4. Klassen V.K., Mikhin A.S. Analiz izmeneniya aktivnosti klinkera na OAO "Sebryakovtsement". Fundamental'nyye issledovaniya. [Klassen V.K., Mikhin A.S. Analysis of changes in the activity of clinker at JSC "Sebryakovtsement". Basic research. 2006. No. 2.P. 63. (In Russ)]
5. Kozlova V.K., Grigor'yev V.G., Malova Ye.YU., Bozhok Ye.V., Manuylov Ye.V. Sravnitel'nyye rezul'taty opredeleniya fazovogo sostava i mikrostruktury klinkerov metodami fiziko-khimicheskogo analiza. Tsement i yego primeneniye. [Kozlova V.K., Grigoriev V.G., Malova E.Yu., Bozhok E.V., Manuylov E.V. Comparative results of determining the phase composition and microstructure of clinkers by methods of physical and chemical analysis. Cement and its application. 2013. No. 3. pp. 34-38. (In Russ)]
6. Lotov V.A. Izmeneniye fazovogo sostava sistemy tsement-voda pri gidratatsii i tverdenii. Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. [Lotov V.A. Change in the phase composition of the cement-water system during hydration and hardening. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. 2012. T. 321. No. 3. pp. 42-45. (In Russ)]
7. Nazimov S.A., Chirkin D.B. Opredeleniye pokazateley kachestva tsementa pri pomoshchi avtomaticheskikh analizatorov. Tsement i yego primeneniye. [Nazimov S.A., Chirkin D.B. Determination of cement quality indicators using automatic analyzers. Cement and its application. 2017. No. 2. pp. 63-65. (In Russ)]
8. Savvinova M.Ye. Issledovaniye prochnosti obraztsov iz zalezhalogo tsementa. V sbornike: Perspektivnyye nauchnyye issledovaniya: opyt, problemy i perspektivy razvitiya. Sbornik statey po materialam mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. [Savvinova M.E. Investigation of the strength of samples from stagnant cement. In the collection: Perspective scientific research: experience, problems and development prospects. Collection of articles based on the materials of the international scientific and practical conference. 2019.pp. 48-51. (In Russ)]
9. Tutov Ye.A., Goloshchapov D.L., Grebenkin S.D., Artamonova O.V. Sorbtziya parov vody na poverkhnostno-modifitsirovannom portlandtsemente. V sbornike: Fiziko-khimicheskiye osnovy ionoobmennyykh i khromatograficheskikh protsessov - "Ionity-2017". [Tutov E.A., Goloshchapov D.L., Grebenkin S.D., Artamonova O.V. Sorption of water vapor on surface-modified Portland cement. In the collection: Physical and chemical foundations of ion exchange and chromatographic processes - "ion exchangers-2017". Materials of the XV International Scientific and Practical Conference dedicated to the 115th anniversary of the discovery of chromatography and the 100th anniversary of Voronezh State University. Editor: V.F. Selemenev. 2017.pp. 318-320. (In Russ)]
10. Chulkova I.L., Galdina V.D. Vliyaniye sostava zhidkoy fazy na protsess tverdeniya tsementov. Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo. [Chulkova I.L., Galdina V.D. Influence of the composition of the liquid phase on the process of hardening of cements. Industrial and civil construction. 2019.No. 12. pp. 48-54. (In Russ)]

Сведения об авторах:

Александр Александрович Крутилин, кандидат технических наук, доцент, кафедра «Строительные материалы и специальные технологии»; kotyra84@bk.ru

Татьяна Владимировна Крапчетова, инженер-аналитик, iwankra@mail.ru

Надежда Александровна Инькова, старший преподаватель, кафедра «Строительные материалы и специальные технологии»; coyote@bk.ru

Олеся Константиновна Пахомова, старший преподаватель, кафедра «Строительные материалы и специальные технологии»; pahomovaolesia@yandex.ru

Information about the authors:

Alexander A.Krutilin, Cand. Sci. (Technical), Assoc. Prof., Department of Building Materials and Special Technologies; kotyra84@bk.ru

Tatiana V. Krapchetova, Analytical Engineer, iwankra@mail.ru

Nadezhda A.Inkova, Senior Lecturer, Department of Building Materials and Special Technologies, coyote@bk.ru

Olesya K.Pakhomova, Senior Lecturer, Department of Building Materials and Special Technologies; pahomovaolesia@yandex.ru

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 29.03.2021.

Принята в печать 15.04.2021.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 29.03.2021.

Accepted for publication 15.04.2021.

Для цитирования: Т.А. Рафальская. Влияние влагонакоплений в наружных стенах на тепловой режим помещений при аварийном теплоснабжении. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2021; 48(2):113-123. DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-2-113-123

For citation: T.A. Rafalskaya. Effects of moisture accumulation in outer walls on thermal mode of premises in case of emergency heat supply. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2021; 48(2):113-123. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-2-113-123

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 626.862.7

DOI: 10.21822/2073-6185-2021-48-2-113-123

ВЛИЯНИЕ ВЛАГОНАКОПЛЕНИЙ В НАРУЖНЫХ СТЕНАХ НА ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ ПОМЕЩЕНИЙ ПРИ АВАРИЙНОМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИИ

Т.А. Рафальская

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин),
630008, г. Новосибирск-8, ул. Ленинградская, 113, Россия

Резюме. Цель. При связанной подаче теплоты в системе теплоснабжения, строительные конструкции выполняют роль теплового аккумулятора. Поэтому при расчете времени остывания помещений при авариях в теплосети необходимо учитывать не только погодные условия, но также снижение поступления тепла от системы теплоснабжения, поскольку при низких температурах наружного воздуха потери теплоты помещениями будут больше тепlopоступлений от системы теплоснабжения, что приведет к накоплению влаги в материалах конструкций. **Метод.** Для построения модели внутреннего режима помещений в аварийном режиме работы системы теплоснабжения применена теория потенциала влажности, позволяющая рассчитать влажностный режим строительных конструкций при различных неперiodических воздействиях. **Результат.** Предложена методика расчета влагонакоплений в наружных стенах жилых помещений с применением теории потенциала влажности. **Вывод.** Определено влияние влагонакоплений на тепловую аккумуляцию наружных стен и динамику температуры внутреннего воздуха помещений в аварийных условиях работы системы теплоснабжения.

Ключевые слова: потенциал влажности, тепловой режим помещений, аварийное теплоснабжение

EFFECTS OF MOISTURE ACCUMULATION IN OUTER WALLS ON THERMAL MODE OF PREMISES IN CASE OF EMERGENCY HEAT SUPPLY

T.A. Rafalskaya

Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin),
113 Leningradskaya Str., Novosibirsk-8 630008, Russia

Abstract. Objective. In the case of a coupled supply of heat in a heat supply system, engineering structures act as a heat accumulator. Therefore, when calculating the premises cooling time in case of accidents in a heating network, it is necessary to take into account not only weather conditions, but also a decrease in the flow of heat from the heat supply system, since at low outside temperatures the heat loss in premises is greater than the heat supply, which will lead to the accumulation of moisture in materials of the structures. **Methods.** To build a model of internal conditions in premises when the heat supply system operates in emergency mode, the humidity potential theory was applied, which allows calculating the humidity mode of engineering structures under various non-periodic exposures. **Results.** A method for calculating moisture accumulation in outer walls of residential premises using the moisture potential theory is proposed. **Conclusion.** The impact of moisture accumulation on heat accumulation in outer walls and the dynamics of internal air temperature in premises under emergency conditions of the heat supply system operation has been determined.

Keywords: humidity potential, thermal conditions in premises, emergency heat supply

Введение. В современных тепловых пунктах систем централизованного теплоснабжения применяется связанная подача теплоты, позволяющая значительно сократить расход воды в

теплосети. В этом случае при максимальном водопотреблении, для нагрева воды на горячее водоснабжение используется часть расхода воды, предназначенного для системы отопления; при отсутствии водопотребления в систему отопления можно подать расход воды больше требуемого для восстановления её тепловой мощности. В системах теплоснабжения со связанной подачей теплоты необходимо учитывать не только изменение температуры наружного воздуха, но и снижение поступления тепловой энергии от тепловой сети. При понижении температуры наружного воздуха система отопления не может компенсировать теплопотери помещений, что приведет к переувлажнению материалов конструкций. В аварийных условиях при охлаждении наружных стен необходимо учитывать фазовый переход влаги в толще наружных ограждений, который замедляет остывание наружных стен за счет тепловыделений при замерзании воды [1].

Постановка задачи. Обозначенные проблемы вызывают необходимость разработки комплексной методики, которая позволит выполнить количественную оценку содержания влаги в материалах строительных конструкций, находящейся в любом фазовом состоянии, а также оценить влияние влагонакоплений в стенах на температуру внутреннего воздуха помещений. Сопротивление проникновению влаги в ограждающие конструкции определяется по СП 50.13330.2012 (акт.: 01.02.2020) «Тепловая защита зданий» по предельно допустимому увлажнению материалов при определении максимального увлажнения. В балансовых уравнениях этой методики не учитывается изменение температуры и относительной влажности внутреннего воздуха, которые принимаются постоянными в течение года [2], в том числе, в аварийных условиях работы системы теплоснабжения. Кроме того, влагонакопления влияют на термическое сопротивление и теплоустойчивость наружных ограждений, и, следовательно, на температуру внутреннего воздуха [3-5].

Методы исследования. К.Ф. Фокиным [6] был разработан метод на основе диффузии водяного пара за счет разности парциальных давлений с наружной и внутренней сторон ограждения. Этот метод позволяет определить область конденсации влаги в толще наружного ограждения, но не показывает, в каком фазовом состоянии находится влага, является ли влажность материала сорбционной или сверхсорбционной.

В.Н. Богословским была разработана теория потенциала влажности [7], но не была предложена последовательная методика расчета влагонакоплений. В отличие от широко применяемой теории, основанной на диффузии водяного пара [6], теория потенциала влажности позволяет рассчитать количество влаги, находящейся в любой фазе и при различных нестационарных воздействиях. Указанные особенности обусловили выбор именно теории потенциала влажности для построения модели теплового режима помещений в аварийном режиме работы системы теплоснабжения.

Определение влагонакоплений в конструкциях стен с применением теории потенциала влажности. Совместный тепло- и влагоперенос в конструкции может быть представлен системой уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial t_{\delta}}{\partial \tau} = a_t \operatorname{div} \left(\frac{\partial t_{\delta}}{\partial x} \right), \\ \frac{\partial e_{\delta}}{\partial \tau} = \frac{\mu}{\rho \xi_0} E_{\delta} \frac{\partial^2 e_{\delta}}{\partial x^2}, \end{cases}, \quad (1)$$

где e_{δ} –упругость водяного пара в порах строительных материалов, Па; E_{δ} – максимальная упругость водяного пара, Па, при температуре t_{δ} ; μ – коэффициент паропроницаемости слоя материала, мг/(м·ч·Па), ρ – плотность, кг/м³; ξ_0 – относительная пароемкость материала; a_t – температуропроводность материала слоя, м²/с.

Решение первого уравнения системы уравнений (1) в конечно-разностной форме для каждой точки i многослойного наружного ограждения для стационарных условий:

$$t_{\delta i} = t_{int} - \frac{t_{int} - t_{ext}}{R_0} (R_{int} + \sum R_i), \quad (2)$$

где R_0 , R_{int} , R_{ext} – термическое сопротивление, $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$, строительной конструкции, внутреннего воздуха и наружного воздуха, соответственно.

Решением второго уравнения системы (1) будет уравнение, определяющее значения упругости водяного пара в толще стены:

$$e_{\delta i} = e_{int} - \frac{e_{int} - e_{ext}}{R_{\mu}} (R_{\mu}^{int} + \sum R_{\mu i}), \quad (3)$$

где e_{int} и e_{ext} – действительные упругости водяного пара в помещении и с наружной стороны ограждения, определяются по формулам:

$$e_{int} = \frac{E_{int} \varphi_{int}}{100}; \quad e_{ext} = \frac{E_{ext} \varphi_{ext}}{100}, \quad (4 \text{ а,б})$$

где E_{int} , E_{ext} – максимальная упругость водяного пара во внутреннем и наружном воздухе, Па; φ_{int} и φ_{ext} – относительная влажность внутреннего и наружного воздуха.

R_{μ} – сопротивление паропроонианию ограждения, $\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}/\text{мг}$ [6, 7]:

$$R_{\mu} = R_{\mu}^{int} + \sum_{l=1}^N \frac{\delta_l}{\mu_l} + R_{\mu}^{ext}, \quad (5)$$

N – количество слоёв.

R_{μ}^{int} , R_{μ}^{ext} – сопротивления влагообмену у внутренней и наружной стороны стены, определяются по формулам В.М. Ильинского:

$$R_{\mu}^{int} = 1 - \frac{\varphi_{int}}{100}; \quad R_{\mu}^{ext} = 1 - \frac{\varphi_{ext}}{100}. \quad (6 \text{ а,б})$$

Влага будет конденсироваться в толще ограждения при выполнении условия:

$$e_{\delta} \geq E_{\delta}. \quad (7)$$

Уравнение (3) позволяет установить количество накапливающегося конденсата при условии, что жидкая влага неподвижна. Перемещение влаги при сверхгигроскопической влажности можно определить, используя уравнения теории потенциала влажности.

Потенциал влажности, позволяющий учитывать движение влаги, как в парообразной, так и в жидкой фазе, был разработан В.Г. Гагариным, В.В. Козловым, К.П. Зубаревым [8]. Наибольшую сложность вызывает построение годового изменения потенциала влажности, зависящего от текущей температуры, относительной влажности наружного воздуха, скорости ветра, величины и продолжительности осадков и солнечной радиации [7]. Помимо этого, коэффициенты влажопроводности строительных материалов зависят от климатических условий местности и индивидуальны для каждого города; определялись они в основном только экспериментально для некоторых материалов ограждений [7, 9, 10]. Влажностный режим в наружных ограждениях зданий на основе потенциала влажности для нестационарных условий можно описать дифференциальным уравнением [11]:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = a_0 \operatorname{div} \left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \right) - a_0 \delta_i \operatorname{div} \left(\frac{\partial t_{\delta}}{\partial x} \right). \quad (8)$$

где a_0 , $\text{м}^2/\text{°В}$ – коэффициент потенциалопроводности влаги; θ – потенциал влажности, °В , в соответствии со шкалой потенциала влажности, в которой изменение равновесной объёмной концентрации водяного пара на 0,01 равно 1°В [10].

Поток влаги в изотермических условиях уравнивается тепловлажопроводностью. Уравнение (8) в конечно-разностной форме будет выглядеть следующим образом:

$$\frac{\Delta \theta}{R_0} = \delta_i \frac{\Delta t_{\delta}}{R_0}, \quad (9)$$

где R_0 – сопротивление влагопередаче, $\text{°В}/\text{м}$; $\Delta \theta = (\theta_i - \theta_{ext})$, °В ; $\Delta t_{\delta} = (t_{\delta i} - t_{ext})$, °С .

Учитывая, что потенциал влажности является комплексным параметром, зависящим от ряда климатических характеристик, представляется целесообразным для внутреннего воздуха определять θ_{int} на основе аналитических зависимостей предложенных в работе [12]:

$$\lg \theta_{int} = 0,057d + 1,056, \quad (10)$$

при $t_{int} > 5^\circ\text{C}$ и $\varphi < 80\%$, $0 < d < 20$.

Влагосодержание воздуха d , г/кг, определяется из формулы [12, 13]

$$\varphi = k_t d, \quad (11)$$

в которой коэффициент k_t зависит от температуры воздуха [13]:

$$k_t = 24,39e^{-0,062t}. \quad (12)$$

При вычислении потенциала влажности наружного воздуха необходимо дополнительно учитывать интенсивность солнечной радиации q_r , кДж/(м²·ч) и подвижность воздуха, v , м/с. Поэтому расчет θ_{ext} ведется по зависимостям, предложенным в [7, 14]:

$$\begin{cases} \theta_{ext} = -3,81 + 0,195t_{ext} + 0,164\varphi - 0,0113q_r - 0,035v, & \text{при } t_{ext} \leq -20^\circ\text{C}, \\ \theta_{ext} = 6,027 + 0,227t_{ext} + 0,46\varphi - 0,006q_r - 0,0483v, & \text{при } -20 \leq t_{ext} \leq -10^\circ\text{C}, \\ \theta_{ext} = 2,86 + 0,219t_{ext} + 0,0965\varphi - 0,0146q_r - 0,0081v, & \text{при } -10 \leq t_{ext} \leq 0^\circ\text{C}, \\ \theta_{ext} = -4,01 + 0,448t_{ext} + 0,169\varphi - 0,0196q_r - 0,001651v, & \text{при } 0 \leq t_{ext} \leq 10^\circ\text{C}, \\ \theta_{ext} = -13,6 + 1,22t_{ext} + 0,204\varphi - 0,01089q_r - 0,022v, & \text{при } 10 \leq t_{ext} \leq 20^\circ\text{C}. \end{cases} \quad (13)$$

Из условия равенства удельных потоков потенциалов влажности определяется разность $\Delta\theta$:

$$\theta_i - \theta_{ext} = \frac{(\theta_{int} - \theta_{ext})R_g}{\sum R_{gi}}, \quad (14)$$

где R_g – сопротивление влагонепроницаемости наружного ограждения, м²·с·(кДж/кг)/кг, находится по формуле [15, 16]:

$$R_g = \sum_{i=1}^n (\delta_i / \chi_i), \quad (15)$$

где δ_i – толщина i -го слоя наружного ограждения, м; χ_i – коэффициент влагонепроницаемости материала i -го слоя, кг/(м·ч·°В); n – число слоёв в ограждающей конструкции.

Применение теории потенциала влажности для расчета влагонакоплений в наружных ограждениях позволяет наиболее полно учесть особенности влагопереноса. Однако на практике применение этой теории затруднено, поскольку коэффициенты теплопроводности строительных материалов будут индивидуальны для каждого города. В.Н. Богословским [7, 13] приводится экспериментальная зависимость коэффициента влагонепроницаемости χ от потенциала влажности θ только для кирпича и пенобетона. Однако даже для этих материалов полученные коэффициенты будут справедливы только для условий г. Москва. Аналитически определить коэффициент влагонепроницаемости различных строительных материалов можно по формуле, предложенной в [12]:

$$\chi = \mu \frac{e_{int} - e_{ext}}{\theta_{int} - \theta_{ext}}. \quad (16)$$

Потенциал влажности, °В, в любом сечении i многослойной конструкции можно найти, подставив в (9) значение $\Delta\theta$ из выражения (14):

$$\theta_i = \theta_{int} - (t_{int} - t_{\delta i}) \frac{R_0 \sum R_{gi}}{R_g \sum R_i} \delta_i. \quad (17)$$

Таким образом, определив распределение температурного поля в конструкции по выражению (2) можно найти распределение потенциала влажности по формуле (17).

Связь между различными шкалами потенциала влажности (°В и кДж/кг) была установлена С.В. Корниенко [10] на основе экспериментальных исследований. Пересчет поля потенциала влажности θ , °В, определенного по формуле (17), в абсолютный потенциал влажности θ_p , кДж/кг, производится по данным [10, табл. 2.5].

Сверхсорбционное увлажнение материалов ограждающих конструкций возникает при выполнении условия:

$$\theta_p > \theta_p^{m.s}, \quad (18)$$

где $\theta_p^{m.s}$ – максимальный сорбционный потенциал влажности материала, кДж/кг, для его определения в [2, 10] предложена формула:

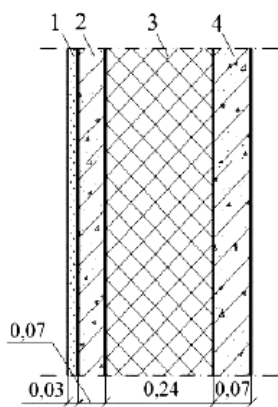
$$\theta_p^{m.s} = \frac{5314}{1 + 107,08 \exp(-0,106 t_{\delta})}. \quad (19)$$

Поглощение влаги материалом определяется зависимостью равновесного влагосодержания w , кг/кг от абсолютного потенциала влажности при разных температурах и характеризуется влагоемкостью материала $c_{\theta p}(\theta_p, t)$. В [10] предложен обобщающий показатель состояния влаги в материале конструкции – относительный потенциал влажности, показывающий степень насыщения материала влагой при изотермически обратимом процессе:

$$\theta_{\varphi} = \theta_p / \theta_p^{m.s}. \quad (20)$$

Используя зависимости равновесного влагосодержания материала w от относительного потенциала влажности θ_{φ} [10, табл. 2.8] определялось количество влаги, накапливаемой в материале конструкции, как капиллярно-связанной, так и свободной.

Обсуждение результатов. Расчет влагонакоплений в наружных стенах проводился в ПК Heating Point [17] для железобетонной конструкции наружной стены, показанной на рис. 1, для условий г. Новосибирска (расчетная температура наружного воздуха -37°C ; средняя температура наиболее холодного месяца $-17,3^{\circ}\text{C}$).



- 1 – гипсовый обшивочный лист (gypsum sheathing sheet) $\rho=800 \text{ кг/м}^3$; $\lambda=0,15 \text{ Вт(м·К)}$;
- 2, 4 – железобетон (reinforced concrete) $\rho=2500 \text{ кг/м}^3$; $\lambda=1,69 \text{ Вт(м·К)}$;
- 3 – плиты минераловатные (mineral wool slabs) $\rho=200 \text{ кг/м}^3$; $\lambda=0,064 \text{ Вт(м·К)}$

Рис.1. Конструкция наружной стены
 Fig. 1. External wall structure

Результаты расчета приведены на рис. 2. Наличие свободной влаги снижает термическое сопротивление стены. Количество свободной влаги в сечении стены показано на рис. 2д. Влага, в основном, накапливается в утеплителе. Однако, присутствие даже очень незначительного количества влаги в конструкционном материале (бетон) будет влиять на распределение температуры по толщине конструкции.

Как показано на рис. 2а, при наличии свободной влаги в стене, температура слоев стены будет ниже (линия 2), чем без учета влагонакоплений (линия 1).

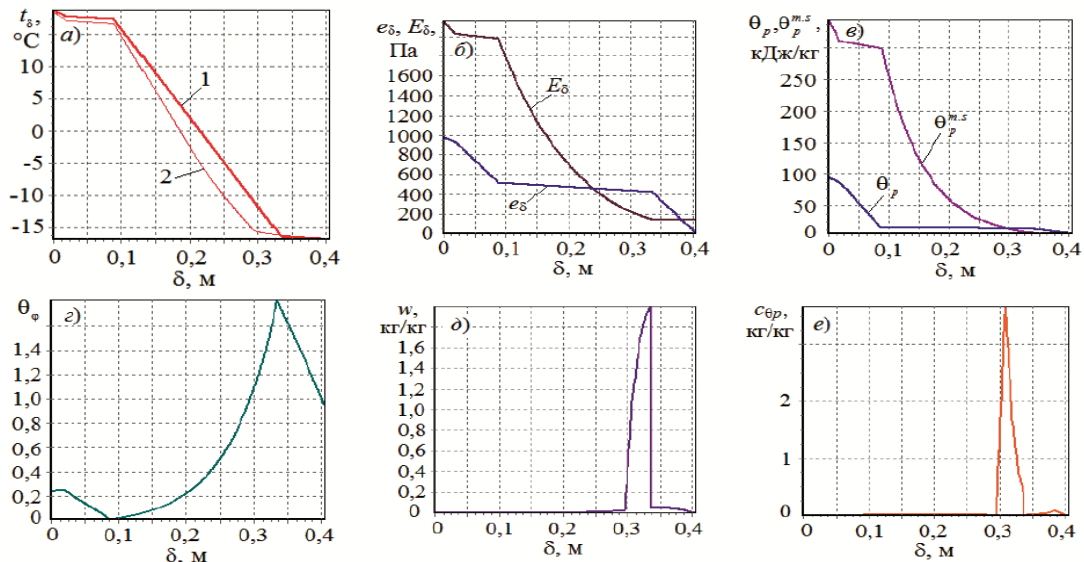


Рис. 2. Результаты расчета влагонакоплений
Fig. 2. Results of calculating moisture accumulation

Теплопроводность слоя в сечении i ограждения определялась с учетом теплопроводности материалов $\lambda_{\delta i}$ и свободной воды λ_{wi} при температуре t_{δ} :

$$\lambda_i = \frac{\lambda_{\delta i} + \lambda_{wi} w_i}{1 + w_i}. \quad (21)$$

Влияние влагонакоплений в стенах на внутреннюю температуру помещений. Влагонакопления в наружных ограждениях будут влиять на изменение температуры внутреннего воздуха помещений, что особенно важно учитывать при аварийном режиме работы системы теплоснабжения. Методика численного моделирования режимов работы тепловых пунктов со связанной подачей теплоты (рис. 3) была предложена в [18].

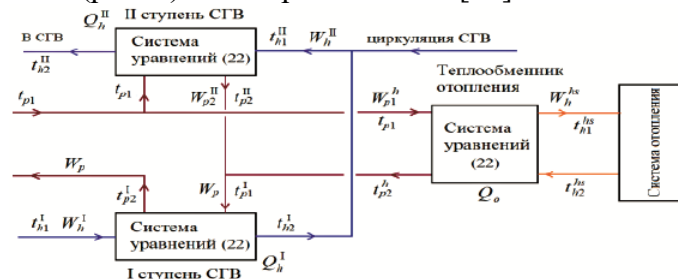


Рис. 3. Схема расчета теплового пункта со связанной подачей теплоты
Fig. 3. Scheme for calculating a heat point with associated heat supply

На рис. 3. тепловая мощность: Q_h^I , Q_h^II , Q_o – подогревателей первой и второй ступени горячего водоснабжения и отопления, соответственно, Вт; температуры воды: t_{h1}^I , t_{h2}^I и t_{h1}^{II} , t_{h2}^{II} – нагреваемой на входе и выходе подогревателей горячего водоснабжения первой и второй ступени; t_{p1}^I , t_{p2}^I и t_{p1}^{II} , t_{p2}^{II} – теплосетевой на входе и выходе подогревателей горячего водоснабжения первой и второй ступени; t_{p1}^h , t_{p2}^h – на входе и выходе подогревателя отопления; t_{h1}^{hs} , t_{h2}^{hs} – в подающей и обратной магистрали отопительной сети, °C; $W = cG$ – эквивалент расхода (c – теплоемкость, G – расход воды): W_h^I , W_h^{II} – нагреваемой воды в первой и второй ступени подогревателей горячего водоснабжения; W_p^I , W_p^{II} – сетевой воды в первой и второй ступени подогревателей горячего водоснабжения; W_p^h – сетевой воды в подогревателе отопления; W_p^{hs} – в системе отопления, Вт/К; СГВ – система горячего водоснабжения.

Для каждого из трех связанных теплообменников (рис. 3) решается система уравнений (22):

$$\left. \begin{aligned}
 Q &= \varepsilon W_{\min} D_t ; \\
 \varepsilon &= \frac{1 - \exp \left[\frac{-kF}{W_{\min}} \cdot \left(1 - \frac{W_{\min}}{W_{\max}} \right) \right]}{1 - \frac{W_{\min}}{W_{\max}} \cdot \exp \left[\frac{-kF}{W_{\min}} \cdot \left(1 - \frac{W_{\min}}{W_{\max}} \right) \right]} ; \\
 W_p &= \begin{cases} \frac{Q}{\varepsilon D_t} & \text{если } W_h > W_p ; \\ \left[\frac{kF}{\Phi} \right]^2 \frac{1}{W_{\min}} = \left[\frac{kF}{\Phi} \right]^2 \frac{\varepsilon D_t}{Q}, & \text{если } W_h < W_p ; \end{cases} \\
 t_{h2} &= t_{h1} + Q/W_h ; \\
 t_{p2} &= t_{p1} - Q/W_p ; \\
 \Delta t &= (\delta t_{\max} - \delta t_{\min}) (\ln \delta t_{\max} - \ln \delta t_{\min})^{-1} ; \\
 \delta t_{\max} &= \begin{cases} t_{p2} - t_{h1}, & \text{если } W_h < W_p ; \\ t_{p1} - t_{h2}, & \text{если } W_h > W_p ; \end{cases} \\
 \delta t_{\min} &= \begin{cases} t_{p1} - t_{h2}, & \text{если } W_h < W_p ; \\ t_{p2} - t_{h1}, & \text{если } W_h > W_p ; \end{cases} \\
 kF &= Q/\Delta t ; \\
 \Phi &= kF/\sqrt{W_p W_h} ; \\
 D_t &= t_{p1} - t_{h1}, \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

где для каждого теплообменника: Q – тепловая мощность, Вт; ε – эффективность; D_t – максимальная разность температур сетевой и нагреваемой воды; k – коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·К); F – площадь, м²; Φ – параметр.

Аналитический способ расчета, основанный на методике [18] приведен в [19].

При аварии на тепловых сетях или источнике теплоты применяется аварийный температурный график регулирования со сниженными параметрами сетевой воды. Так, в Новосибирске температура воды в аварийном режиме работы $t_{p1}^{\text{em}} = 85^\circ\text{C}$ при расчетной температуре воды $t_{p1}' = 150^\circ\text{C}$ (рис. 4а) [20]. Расчет выполнялся в ПК HeatingPoint [17] для зданий, присоединенных к центральному тепловому пункту (ЦТП-п27) в Первомайском районе г. Новосибирска с расчетной тепловой мощностью на отопление $Q_{\text{omax}} = 11,042$ МВт; на вентиляцию $Q_{\text{vmax}} = 3,200$ МВт; на горячее водоснабжение $Q_h = 9,542$ МВт. На рис. 4 показаны результаты расчета режимов работы теплового пункта в аварийном режиме.

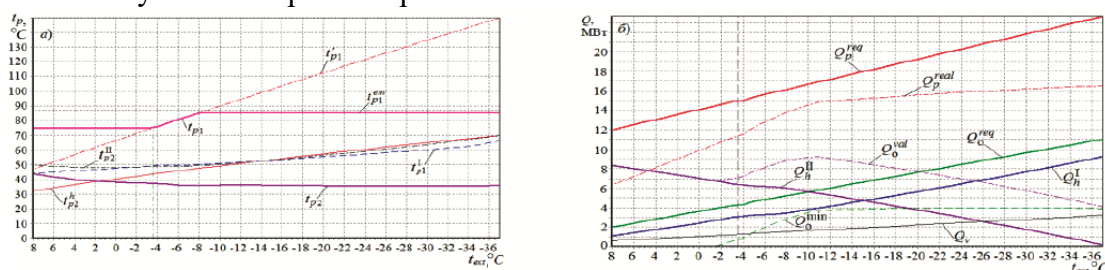


Рис. 4. Режимы работы ЦТП при аварийном графике отпуска теплоты

Fig. 4. Modes of operation of the Central HS in case of an emergency schedule of heat supply

Снижение температуры сетевой воды снижает располагаемую тепловую мощность системы теплоснабжения Q_p^{real} , которая будет меньше требуемой тепловой мощности Q_p^{req} (рис. 4б). Соответственно, снизится тепловая мощность системы отопления, которая в аварийном режиме работы теплосети в условиях максимального водопотребления в СГВ будет Q_o^{min} и меньше требуемой Q_o^{req} . При отсутствии водопотребления в СГВ или в случае отключения второй ступени подогревателя горячего водоснабжения, располагаемая тепловая мощность систе-

мы отопления будет соответствовать линии Q_o^{val} на рис. 4б. Однако, даже в этом случае при низких наружных температурах (ниже -21°C), система отопления не сможет обеспечить температуру в помещениях даже $+18^{\circ}\text{C}$, поскольку $Q_o^{val} < Q_o^{req}$.

Основываясь на методике [18] в [20, 21] был предложен способ определения допустимой длительности работы системы теплоснабжения в аварийных условиях для тепловых пунктов с различным соотношением тепловых нагрузок ρ на горячее водоснабжение Q_h и отопление Q_{omax} для зданий с наружными стенами с различными коэффициентами тепловой аккумуляции β [21]. Коэффициенты тепловой аккумуляции определялись по формуле Ю.В. Кононовича [22], похожая методика применяется и за рубежом, например [23].

$$\beta = \frac{k_t \sum \delta_i c_i \rho_i F_i / 2}{3600 \sum k_j F_j + L(c\rho)_{inf}}, \quad (23)$$

где $k_t = 0,92$ для угловых помещений и радиаторных систем отопления; $\delta_i, \rho_i, c_i, F_i$ – толщина, м, плотность, кг/м^3 , теплоёмкость, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$, площадь, м^2 , i -го слоя материала; L, ρ_{inf}, c_{inf} – расход, $\text{м}^3/\text{ч}$, плотность, кг/м^3 , теплоёмкость, $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$, инфильтрационного воздуха; k_j, F_j – коэффициент теплопередачи и площадь конструкции.

Для присоединенных к ЦТП 14-этажных зданий, с наружными стенами, показанными на рис. 1, коэффициент тепловой аккумуляции без учета влагонакоплений в стенах составил $\beta = 41,55$ ч. С учетом снижения термического сопротивления вследствие увлажнения материалов конструкций коэффициент тепловой аккумуляции $\beta_w = 38,95$ ч. Температура наружного воздуха t_{ext} принята по [24] в течение 6-10 декабря 2018 г, рис. 5.

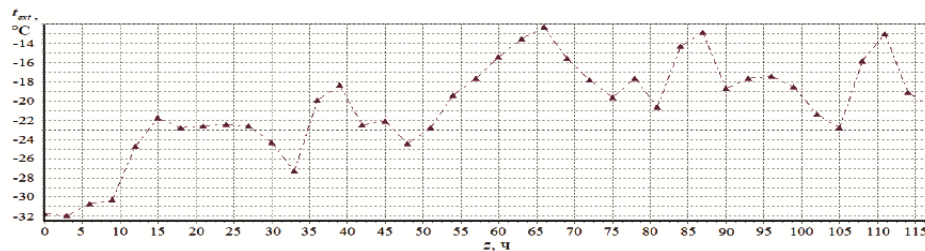


Рис. 5. Температура наружного воздуха 6-10 декабря 2018 г.

Fig. 5. Outside air temperature December 6-10, 2018

Эксплуатационные температура сетевой воды в подающей t_{p1}^{exp} и в обратной t_{p2}^{exp} магистрали и расход воды в теплосети G в этот период времени показаны на рис. 6.

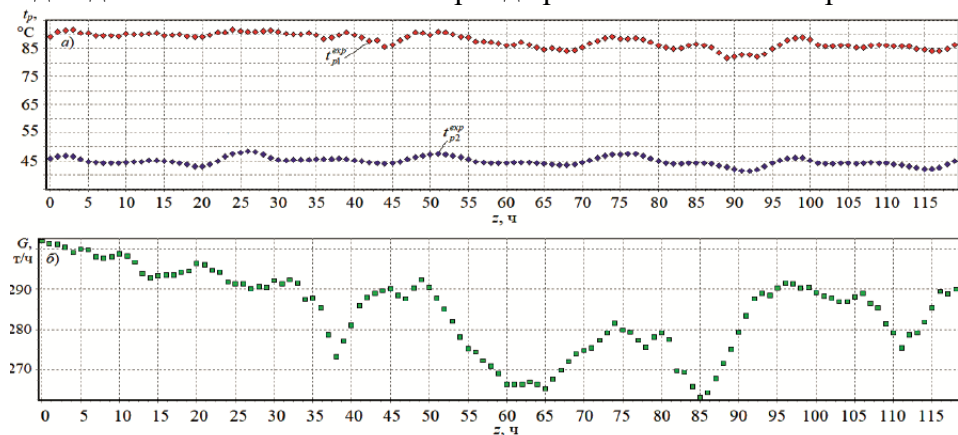


Рис. 6. Температура (а) и расход воды в теплосети (б) 6-10 декабря 2018 г.

Fig. 6. Temperature (a) and water flow rate in the heating network (b) December 6-10, 2018

Температура внутреннего воздуха t_{int} (без учета влагонакоплений в стенах) в сравнении с t_{int}^w (с учетом свободной влаги) определялась по методике [20, 21] в аварийном режиме работы системы теплоснабжения (рис. 6) при текущей наружной температуре (рис. 5), и переменном

водопотреблении в СГВ, по формуле, предложенной Е.Я Соколовым [25]. Результаты расчета приведены на рис. 7.

$$t_{int}^{real}(z) = t_{ext} + \left[\frac{Q_o}{Q_o^{req}} + \left(\frac{t_{int}^{cur} - t_{ext}}{t_{int}^{req} - t_{ext}} - \frac{Q_o}{Q_o^{req}} \right) e^{\frac{-z}{\beta}} \right] (t_{int}^{req} - t_{ext}), \quad (24)$$

где t_{int}^{cur} – текущая температура внутреннего воздуха за рассматриваемый период времени z , ч;
 $t_{int}^{req} = 18^\circ\text{C}$ – температура внутреннего воздуха, на которую рассчитан температурный график регулирования.

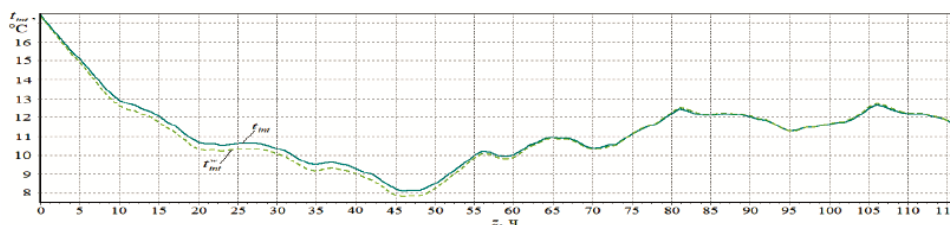


Рис. 7. Температура внутреннего воздуха помещений 6-10 декабря 2018 г.

Fig. 7. Indoor air temperature on December 6-10, 2018

После снижения параметров теплоносителя при низкой наружной температуре (рис. 5), температура внутреннего воздуха постепенно понижается. В начальный момент времени наличие в конструкции влаги в свободном состоянии мало влияет на изменение температуры внутреннего воздуха, что связано с двумя противоположно направленными процессами: конденсацией влаги с выделением тепла и одновременным увеличением теплопроводности строительной конструкции.

Однако с течением времени большая часть влаги конденсируется, и увеличение теплопроводности увлажненного материала сказывается на снижении термического сопротивления стены, и, соответственно, на снижении температуры внутреннего воздуха. Далее, с повышением температуры наружного воздуха, температура внутреннего воздуха несколько повышается и стабилизируется приблизительно на уровне, соответствующем точке росы внутреннего воздуха (рис. 7).

Вывод. Разработана комплексная методика, позволяющая определить влияние свободной влаги, накапливаемой в строительных конструкциях на температуру внутреннего воздуха помещений в аварийных условиях работы теплосети.

Наличие влагонакоплений не только влияет на теплотехнические характеристики наружных ограждений, но также снижает их теплоаккумулирующую способность, которая является важным свойством конструкций при связанной подаче теплоты. Поведение свободной влаги в строительной конструкции необходимо учитывать при определении допустимого времени остывания помещений при аварии в тепловых сетях.

Библиографический список:

1. Самарин О.Д. О расчёте охлаждения наружных стен в аварийных режимах теплоснабжения // Известия вузов. Строительство, 2007. № 2. С. 46-50.
2. Корниенко С.В. Уточнение расчетных параметров микроклимата помещений при оценке влагозащитных свойств ограждающих конструкций // Вестник МГСУ, 2016. № 11. С. 132-142.
3. D'Agostino D. Moisture dynamics in an historical masonry structures: the Cathedral of Lecce (South Italy) // Building and Environment, 2013. Vol. 63. pp. 122-133.
4. Woroniak G., Piotrowska-Woroniak J. Effects of pollution reduction and energy consumption reduction in small churches in Drohiczyn community // Energy and Buildings, 2014. Vol. 72. Pp. 51-61.
5. Sadiq H., Wong M.B., Zhao X.L., Al-Mahaidi R. Heat transfer model for a cementitious-based insulation with moisture // Fire and materials, 2014. Vol. 38. Iss. 5. pp. 550-558.
6. Фокин К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий. М.: Авок-пресс, 2006. 256 с.
7. Богословский В.Н. Строительная теплофизика. Москва: АВОК Северо-Запад, 2006. 400 с.
8. В.Г. Гагарин, К.П. Зубарев. Применение теории потенциала влажности к моделированию нестационарного влажностного режима ограждений // Вестник МГСУ, 2019. Т. 14. Вып. 4. С. 484-493.
9. Кучеренко М.Н, Чиркова Е.В. Применение теории потенциала влажности для расчёта переноса влаги через наружные ограждения // Известия вузов. Строительство, 2013. № 5. С. 63-67.

10. Корниенко С.В. Повышение энергоэффективности зданий за счет совершенствования методов расчета температурно-влажностного режима ограждающих конструкций // Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Волгоград, 2018. 380 с.
11. Перехоженцев А.Г. Расчет распределения влаги в многослойных ограждающих конструкциях на основе потенциала влажности при неизотермическом квазистационарном режиме // Вестник ВолгГАСУ. Серия: Строительство и архитектура, 2006. Вып. 6(21). С. 10-13.
12. Кучеренко М.Н., Чиркова Е.В. Термодинамическое обоснование определения коэффициента влагопроводности строительных материалов // Приволжский научный журнал, 2010. № 4. С. 129-135.
13. Богословский В.Н. Основы теории потенциала влажности материала применительно к наружным ограждениям оболочки зданий. Москва: МГСУ, 2013. 112 с.
14. Бодров В.И. Регулирование интенсивности потоков влаги в наружных ограждениях // Приволжский научный журнал, 2012. № 4. С. 85-89.
15. Корниенко С.В. Инженерная оценка влажности наружных стен // Вестник ВолгГАСУ, 2015. Вып. 1(37). С. 1-13.
16. Корниенко С.В. Температурно-влажностный режим наружных стен с вентилируемым фасадом // ACADEMIA. Архитектура и строительство, 2009. №5. С. 389-394.
17. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020666554. HeatingPoint / автор Рафальская Т.А. (RU); правообладатель: Рафальская Т.А. (RU) за-явл. 03.11.2020; опубли. 11.12.2020.
18. Rafalskaya T.A. Investigating the Possibility of Using Low-Temperature Heat Supply with the Central Qualitative Regulation // Thermal Engineering, 2019, Vol. 66, No 11, pp. 858-867.
19. Рафальская Т. А. Уравнения температурных графиков режимов работы теплового пункта с двухступенчатой схемой присоединения подогревателей горячего водоснабжения // Научный журнал строительства и архитектуры, 2020. № 2 (58). С. 29-41.
20. Рафальская Т.А. Энергетическая безопасность теплоснабжения при аварийном режиме отпуска теплоты от ТЭЦ // Промышленная энергетика, 2016. №11. С. 23-27.
21. Рафальская Т.А., Мансуров Р.Ш., Березка А.К., Савенков А.А. Исследование теплозащиты наружных ограждений зданий при аварийном теплоснабжении // Вестник Сам-ГТУ. Технические науки, 2017. №3 (55). С. 98-109.
22. Кононович Ю.В. Тепловой режим зданий массовой застройки. Москва: Стройиздат, 1986. 157 с.
23. Hongwei Li, Stephen Jia Wang. Load Management in District Heating Operation // Energy Procedia 75 (2015) 1205-1207. Doi:10.1016/j.egypro.2015.07.155.
24. Погода и климат в Новосибирске. Погода и климат [Электронный ресурс]. Режим доступа. – URL: <http://www.pogodaiklimat.ru> (дата обращения 10.02.2021).
25. Соколов Е.Я. Теплофикация и тепловые сети. М.: Издательство МЭИ, 2001. 472 с.

References:

1. Samarin O.D. O raschote okhlazhdeniya naruzhnykh sten v avariynykh rezhimakh teplo-snabzheniya // Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [Samarin O.D. On the calculation of the cooling of external walls in emergency modes of heat supply // Izvestiya vuzov. Construction, 2007. No. 2. pp. 46-50. (In Russ)]
2. Korniyenko S.V. Utochneniye raschetnykh parametrov mikroklimata pomeshcheniy pri otsenke vlagozashchitnykh svoystv ograzhdayushchikh konstruksiy [Korniyenko S.V. Refinement of the calculated parameters of the microclimate of the premises when assessing the moisture-protective properties of the enclosing structures. Vestnik MGSU, 2016. No. 11. pp. 132-142. (In Russ)]
3. D'Agostino D. Moisture dynamics in an historical masonry structures: the Cathedral of Lecce (South Italy) // Building and Environment, 2013. Vol. 63. pp. 122-133.
4. Woroniak G., Piotrowska-Woroniak J. Effects of pollution reduction and energy consumption reduction in small churches in Drohiczyn community // Energy and Buildings, 2014. Vol. 72. pp. 51-61.
5. Sadiq H., Wong M.B., Zhao X.L., Al-Mahaidi R. Heat transfer model for a cementitious-based insulation with moisture // Fire and materials, 2014. Vol. 38. Iss. 5. pp. 550-558.
6. Fokin K.F. Stroitel'naya teploekhnika ograzhdayushchikh chastey zdaniy. Moskva: AVOK-PRESS. [Fokin K.F. Building heat engineering of building envelopes. Moscow: AVOK-PRESS, 2006. 256 p. (In Russ)]
7. Bogoslovskiy V.N. Stroitel'naya teplofizika. [Bogoslovsky V.N. Building thermal physics. Moscow: AVOK North-West, 2006. 400 p. (In Russ)]
8. V.G. Gagarin, K.P. Zubarev. Primeneniye teorii potentsiala vlazhnosti k modelirovaniyu nestatsionarnogo vlazhnostnogo rezhima ograzhdeniy. [V.G. Gagarin, K.P. Zubarev. Application of the theory of moisture potential to modeling the non-stationary moisture regime of fences // Vestnik MGSU, 2019. V. 14. Issue. 4.S. 484-493. (In Russ)]
9. Kucherenko M.N., Chirkova Ye.V. Primeneniye teorii potentsiala vlazhnosti dlya rascheta perenosy vlagi cherez naruzhnyye ograzhdeniya. [Kucherenko M.N., Chirkova E.V. Application of the theory of moisture potential for calculating moisture transfer through external enclosures // Izvestiya vuzov. Construction, 2013. No. 5. S. 63-67.
10. Korniyenko S.V. Povysheniye energoeffektivnosti zdaniy za schet sovershenstvovaniya metodov rascheta temperaturno-vlazhnostnogo rezhima ograzhdayushchikh konstruksiy. [Korniyenko S.V. Improving the energy efficiency

of buildings by improving methods for calculating the temperature and humidity conditions of enclosing structures // Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences. Volgograd, 2018.380 p. (In Russ)]

11. Perekhozhenyev A.G. Raschet raspredeleniya vlagi v mnogosloynnykh ograzhdayushchikh konst-ruktsiyakh na osnove potentsiala vlazhnosti pri neizotermicheskom kvazistatsionarnom rezhime [Perekhozhenyev A.G. Calculation of moisture distribution in multilayer enclosing structures based on the moisture potential in non-isothermal quasi-stationary mode // Vestnik VolgGASU. Series: Building and architecture, 2006. Vol. 6 (21). pp. 10-13. (In Russ)]

12. Kucherenko M.N., Chirkova Ye.V. Termodinamicheskoye obosnovaniye opredeleniya koeffi-tsiyenta vlagoprovodnosti stroitel'nykh materialov. [Kucherenko M.N., Chirkova E.V. Thermodynamic substantiation of determining the coefficient of moisture conductivity of building materials // Privolzhsky scientific journal, 2010. No. 4. pp. 129-135. (In Russ)]

13. Bogoslovskiy V.N. Osnovy teorii potentsiala vlazhnosti materiala primenitel'no k naruzhnym ograzhdeniyam obolochki zdaniy. [Bogoslovsky V.N. Fundamentals of the theory of material moisture potential as applied to the outer fences of the building envelope. Moscow: MGSU, 2013.112 p. (In Russ)]

14. Bodrov V.I. Regulirovaniye intensivnosti potokov vlagi v naruzhnykh ograzhdeniyakh [Bodrov V.I. Regulation of the intensity of moisture flows in external enclosures // Privolzhsky scientific journal, 2012. No. 4. pp. 85-89. (In Russ)]

15. Korniyenko S.V. Inzhenernaya otsenka vlazhnosti naruzhnykh sten.[Kornienko S.V. Engineering assessment of the moisture content of external walls//Bulletin of VolgGASU, 2015. Issue. 1(37). pp.1-13. (In Russ)]

16. Korniyenko S.V. Temperaturno-vlazhnostnyy rezhim naruzhnykh sten s ventiliruyemym fasadom // ACA-DEMIA. [Kornienko S.V. Temperature and humidity conditions of external walls with a ventilated facade // ACADEMIA. Architecture and construction, 2009. No. 5. pp. 389-394. (In Russ)]

17. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM № 2020666554. [Certificate of state registration of a computer program No. 2020666554. HeatingPoint / author Rafalskaya T.A. (RU); copyright holder: Rafalskaya T.A. (RU) app. 03.11.2020; publ. 11.12.2020. (In Russ)]

18. Rafalskaya T.A. Investigating the Possibility of Using Low-Temperature Heat Supply with the Central Qualitative Regulation // Thermal Engineering, 2019, Vol. 66, no.11, pp. 858-867.

19. Rafal'skaya T. A. Uravneniya temperaturnykh grafikov rezhimov raboty teplovogo punkta s dvukhstupenchatoy skhemoy prisoyedineniya podogrevateley goryachego vodosnab-zheniya. [Rafalskaya T. A. Equations of temperature graphs of operating modes of a heating station with a two-stage connection scheme for hot water heaters // Scientific journal of construction and architecture, 2020. No. 2 (58). pp. 29-41. (In Russ)]

20. Rafal'skaya T.A. Energeticheskaya bezopasnost' teplosnabzheniya pri avariynom rezhime otpuska teploty ot TETS . [Rafalskaya T.A. Energy security of heat supply in emergency mode of heat supply from CHPP // Industrial energy, 2016. No. 11. pp. 23-27. (In Russ)]

21. Rafal'skaya T.A., Mansurov R.SH., Berezka A.K., Savenkov A.A. Issledovaniye teploza-shchity naruzhnykh ograzhdeniy zdaniy pri avariynom teplosnabzhenii. [Rafalskaya T.A., Mansurov R.Sh., Berezka A.K., Savenkov A.A. Investigation of heat protection shields of external enclosures of buildings during emergency heat supply. Vestnik Sam-GTU. Technical sciences, 2017. No. 3 (55). pp. 98-109. (In Russ)]

22. Kononovich YU.V. Teplovoy rezhim zdaniy massovoy zastroyki. [Kononovich Yu.V. Thermal regime of buildings of mass development. Moscow: Stroyizdat, 1986.157 p. (In Russ)]

23 Hongwei Li, Stephen Jia Wang. Load Management in District Heating Operation // Energy Procedia 75 (2015) 1205-1207. Doi: 10.1016 / j.egypro.2015.07.155.

24. Pogoda i klimat v Novosibirske. Pogoda i klimat [Weather and climate in Novosibirsk. Weather and climate [El. resource]. Access mode. - URL: <http://www.pogodaiklimat.ru> (date of access 10.02.2021). (In Russ)]

25. Sokolov Ye.YA. Teplofikatsiya i teplovyye seti. [Sokolov E.Ya. Heating and heating networks. Moscow: MEI Publishing House, 2001.472 p. (In Russ)]

Сведения об авторе:

Рафальская Татьяна Анатольевна, кандидат технических наук, доцент; rafalskaya.ta@yandex.ru

ORCID 0000-0002-6304-8680

Information about the author:

Tatiana A. Rafalskaya, Cand. Sci. (Technical), Assoc. Prof; rafalskaya.ta@yandex.ru

Конфликт интересов.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 28.04.2021.

Принята в печать 31.05.2021.

Conflict of interest.

The author declare no conflict of interest.

Received 28.04.2021.

Accepted for publication 31.05.2021.

Для цитирования: О.М. Устарханов, Х.М. Муселемов, Х.М. Гаппаров. Напряженно-деформированное состояние трехслойной конструкции с учетом гипотезы о кубическом распределении перемещений по толщине заполнителя. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2021; 48 (2):124-132. DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-2-124-132

For citation: O. M. Ustarkhanov, Kh. M. Muselemov, Kh. M. Gapparov. Stress-deformed state of a three-layer structure taking into account the hypothesis of cubic displacement pattern over the thickness of a filler. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2021; 48(2):124-132. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-2-124-132

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 624.011

DOI: 10.21822/2073-6185-2021-48-2-124-132

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ТРЕХСЛОЙНОЙ КОНСТРУКЦИИ С УЧЕТОМ ГИПОТЕЗЫ О КУБИЧЕСКОМ РАСПРЕДЕЛЕНИИ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ПО ТОЛЩИНЕ ЗАПОЛНИТЕЛЯ

О.М. Устарханов, Х.М. Муселемов, Х.М. Гаппаров

Дагестанский государственный технический университет,
367026 г. Махачкала, пр. И.Шамиля, 70, Россия

Резюме. Цель. При определении напряженно-деформированного состояния трехслойных конструкций в большинстве случаев используются гипотезы, в соответствии с которыми принимается, что несущие слои подчиняются гипотезе Кирхгофа-Лява, а заполнитель - гипотезе Нойта (Vander Neit) или «ломаной линии». Но во многих случаях результаты наших исследований показывают, что это не всегда соответствует действительности. **Метод.** Трехмерную задачу по определению напряженно-деформированного состояния трехслойных конструкций предлагается решать при помощи кубической функций закона распределения деформации заполнителя по нормали, полученной на основе закона о совместности деформации на границах «заполнитель - несущий слой» и построении граничных условий в зонах стыка. **Результат.** Полученные на основе этой гипотезы уравнения равновесия трехслойной балки приведены в таблице 1. Приведенные дифференциальные уравнения в частных производных имеют 12-ый порядок и для упрощения решения преобразованы в однородные уравнения 1-го порядка. Реализуется данное решение с помощью пакета прикладных программ математического моделирования «Maple 5.4». **Вывод.** Работа заполнителя в направлении оси OX имеет определенное значение, которое влияет на общее напряженное состояние трехслойной конструкции (в существующих гипотезах оно равно нулю).

Ключевые слова: трёхслойная конструкция, несущий слой, заполнитель, гипотеза, напряжённно-деформированное состояние, уравнения равновесия

STRESS-DEFORMED STATE OF A THREE-LAYER STRUCTURE TAKING INTO ACCOUNT THE HYPOTHESIS OF CUBIC DISPLACEMENT PATTERN OVER THE THICKNESS OF A FILLER

O. M. Ustarkhanov, Kh. M. Muselemov, Kh. M. Gapparov

Daghestan State Technical University,
70 I. Shamilya Ave., Makhachkala 367026, Russia

Abstract. Objective. In most cases, when determining the stress-deformed state of three-layer structures, it is assumed that bearing layers obey the Kirchhoff-Love hypothesis, while a filler obey the Neit (vanderNeit), or “broken line”, hypothesis. But in many cases, the results of our research show that this is not always accurate. **Methods.** It is proposed to solve the three-dimensional problem of determining the stress-deformed state of a three-layer structure using cubic functions of the law of aggregate deformation distribution along the normal line, obtained on the basis of the law of deformation compatibility at “filler – bearing layer” boundaries and the construction of boundary condi-

tions in joint zones. **Results.** Equilibrium equations of a three-layer beam obtained on the basis of this hypothesis are shown in Table 1. The given partial differential equations are of the 12th order and we transformed them into homogeneous equations of the 1st order to simplify the solution. This solution is implemented using the mathematical modelling software package Maple 5.4. **Conclusion.** The work of the filler in the direction of OX axis has a certain value, which affects the overall stress state of the three-layer structure (in existing hypotheses, it is zero).

Keywords: three-layer structure, bearing layer, filler, hypothesis, stress-deformed state, equilibrium equations

Введение. Впервые основы теории расчета трехслойных оболочек были изложены в работах [1, 11-14]. В настоящее время к теории расчета трехслойных пластин и оболочек имеется два подхода [7]:

1. Для вывода уравнений равновесия (движения) применяются кинематические гипотезы для каждого отдельного слоя, при этом порядок системы зависит от числа слоев.
2. Для вывода уравнений равновесия (движения) используются гипотезы, применяемые для трехслойной конструкции в целом.

Первый подход расчета трехслойных конструкций позволяет точно описывать их напряженно-деформированное состояние, но связан трудностями расчета.

Во втором подходе в меньшей степени отражается реальное напряженно-деформированное состояние конструкции. С другой стороны, это позволяет относительно легко, и достаточно точно определять напряженно-деформированное состояние трехслойной конструкции для инженерных расчетов.

Постановка задачи. Для вывода уравнений равновесия трехслойных конструкций с легким заполнителем и тонкими несущими слоями, при втором подходе, вводятся гипотезы о характере распределения перемещений или напряжений по толщине пакета.

В расчетах конструкций с легким заполнителем и тонкими несущими слоями, как правило, используются следующие допущения:

- напряжения σ_{xx} , σ_{yy} в заполнителе равны нулю или, то же самое, модули упругости заполнителя E_{xx} , E_{yy} и модуль сдвига G_{xy} равны нулю;
- поперечные деформации заполнителя (в направлении по нормали к поверхностям несущих слоев) пренебрежимо малы;
- несущие слои рассматриваются как мембраны (неравномерностью распределений напряжений по несущему слою и изгибной жесткостью несущих слоев пренебрегают).

В.В.Болотин, исследуя пластины, состоящие из слоев с существенно-различными физико-механическими характеристиками, применял для несущих слоев гипотезы Кирхгофа-Лява, а для слоев связующего допущения о распределении перемещений по толщине в соответствии с линейным законом [2].

Результатом первого периода развития теории расчета трехслойных оболочек явились общепринятые ныне гипотезы о ломаной линии [5], которые являются основой для исследования прочности и устойчивости большинства современных трехслойных конструкций.

Согласно этим гипотезам несущие слои работают в соответствии с классическими представлениями теории тонкостенных оболочек, то есть в соответствии с гипотезой Кирхгофа - Лява, принимающей сохранение нормали, нормаль в заполнителе, хотя и перестает быть нормалью при деформации пакета, но остается прямолинейной. Обычно полагают, что сжимаемость заполнителя в поперечном направлении отсутствует, то есть длина нормали постоянна. Дальнейшие исследования показали высокую эффективность этих гипотез и возможность их применения к решению широкого класса задач по прочности и устойчивости трехслойных пластин и оболочек.

Разновидностью гипотезы о ломаной линии является гипотеза о прямолинейном элементе: считается, что нормальный элемент для всего пакета остается прямолинейным. Если прене-

бредь изгибными жесткостями несущих слоев, то обе гипотезы становятся эквивалентными. Результаты исследований показывает, что это не соответствует действительности. Сравнение результатов экспериментальных и теоретических исследований многослойных оболочек свидетельствует о том, что использование гипотез деформирования, общих для всего пакета в целом, не учёт деформаций поперечного сдвига и других особенностей многослойных оболочек, связанных с существенными различиями физико-механических свойств отдельных слоев, накладывает ограничения на использование большинства вариантов теории многослойных оболочек.

В работе [3] приведены результаты анализа различных моделей слоев многослойных оболочек. В зависимости от механических характеристик материалов целесообразно различать жесткие и мягкие слои. Жесткими называются слои, для которых выполняются гипотезы обычной теории пластин и оболочек. Для мягких слоев имеет место значительное отступление от указанных гипотез. Деформации, которые в обычной теории пластин и оболочек полагаются пренебрежимо малыми (поперечные сдвиги и относительные удлинения нормалей), для мягких слоев играют преобладающую роль. Гипотезы Кирхгофа - Лява и Тимошенко заменены здесь предположениями о законе распределения этих деформаций по толщине мягкого слоя.

В большинстве расчетных методик трехслойных конструкций используется гипотеза о распределении перемещений по толщине заполнителя согласно линейному закону. Это приводит к постоянству касательных напряжений в плоскости XOZ (YOZ). Отсюда можно сделать вывод, что разрушение конструкции равновероятно в любой точке, независимо от расстояния до срединной поверхности. Однако практика экспериментальных исследований трехслойных конструкций показывает, что их разрушение всегда происходит либо по границе «заполнитель - несущий слой» (для конструкций, собираемых с помощью клея), либо вблизи этой границы (для конструкций, собираемых с помощью сварки или пайки). Следовательно, касательные напряжения в заполнителе не являются постоянными.

К тому же, часто влияние одной нагрузки накладывается на влияние другой. Именно поэтому для исследования данного типа задач, а также расчетов, имеющих целью нахождение напряженно-деформированного состояния в окрестностях точек приложения сосредоточенных сил, вблизи опорных закреплений (то есть в зонах краевых эффектов), необходимо более точно и детально рассматривать все компоненты тензора деформаций. А при оценке прочности в задачах такого типа применять критерии прочности, учитывающие полное трехмерное напряженно-деформированное состояние с учетом анизотропии приведенных параметров заполнителя.

Таким образом, несмотря на большое число публикаций по расчету трехслойных оболочек, ряд основополагающих вопросов по исследованию прочности современных и перспективных трехслойных конструкций, выполненных из композиционных материалов, остались неразрешенными. Сюда относятся в первую очередь краевые задачи трехслойных цилиндрических оболочек, задачи связанные с учетом слоистости, физической и геометрической несимметрии как несущих слоев, так и всего пакета.

При получении зависимостей для анализа прочности и жесткости трехслойных конструкций необходимо оговорить применяемые гипотезы, которые являются основополагающими при составлении уравнений, описывающих напряженно-деформированное состояние.

Методы исследования. В данной статье за основу было принято, что несущие слои подчиняются гипотезам Кирхгофа - Лява. Это предположение, как правило, не вызывает сомнений, поскольку неоднократно было подтверждено многочисленными исследованиями тонкостенных трехслойных элементов.

При рассмотрении работы заполнителя большинство предыдущих исследователей в данной области принимали гипотезу о «ломаной линии» или гипотезу Нойта (Vander Neit), которая гласит, что перемещения в заполнителе, как и в несущих слоях описываются линейным законом, а, следовательно, сдвиговые напряжения постоянны по толщине.

Однако, как отмечалось выше, при испытании весьма тщательно изготовленного образца трехслойной конструкции заполнитель всегда разрушается вблизи границы раздела «запол-

нитель - несущий слой». Поэтому наиболее логично принять нелинейный закон для описания деформации заполнителя по толщине - такой, который наиболее полно отражает физическую картину деформации заполнителя.

Вместе с тем экспериментальные исследования трехслойных стержней, пластин и оболочек показывают, что, несмотря на относительно малые значения нормальных напряжений в заполнителе, действующих в направлениях, параллельных срединным поверхностям несущих слоев, эти напряжения:

- во-первых, вследствие относительно большой толщины заполнителя воспринимают значительную долю всей энергии, затрачиваемой на деформацию трехслойной конструкции (в некоторых случаях до 20-30 %),
- во-вторых, эти напряжения сравнимы с предельно допустимыми для материала заполнителя, и непринятие их во внимание может привести к значительным погрешностям в оценке несущей способности конструкции.

Таким образом, на основе вышесказанного, для расчета напряженно-деформированного состояния трехслойных конструкций предлагается ввести гипотезу о кубическом распределении перемещений по толщине заполнителя, функция распределения перемещений, в общем, представляется в виде $U=A+Bz+Cz^2+Dz^3$.

Отсюда следует, что функция распределения сдвиговых напряжений по толщине имеет квадратичную зависимость. Эта гипотеза подтверждена рядом экспериментальных работ, проведенных с различными типами заполнителей [6].

Предложенная гипотеза справедлива, если выполнено условие [9].

$$\frac{E_3 c}{B_{1,2}} < \frac{2}{3}, \quad (1)$$

где E_3 - модуль упругости заполнителя, c - толщина заполнителя,

$B_{1,2}$ - жесткость несущих слоев на растяжение.

Таким образом, заполнитель должен быть не очень жестким. Но, как показывают практика и анализ современных конструктивных решений, это условие выполняется в большинстве случаев применения трехслойных конструкций.

В работе также сделано предположение, что заполнитель деформируется в направлении нормали к срединной поверхности по линейному закону, так как деформации в этом направлении гораздо меньше, чем деформации в продольных направлениях. Но это также своеобразный шаг вперед по отношению к предыдущим исследованиям, так как многие авторы вовсе не учитывают этот вид деформации.

В связи с тем, что несущие слои могут быть достаточно жесткими, в уравнениях равновесия несущих слоев авторами принято решение сохранять все члены, описывающие сопротивление несущих слоев при изгибе и кручении. То есть, несущие слои описываются моментной теорией.

Как было сказано выше, заполнитель считается достаточно жестким при работе на растяжение - сжатие, а при относительно большой его толщине следует считать, что заполнитель также должен достаточно хорошо сопротивляться изгибу. Отсюда следует вывод, что и заполнитель описывается моментной теорией.

Здесь необходимо еще раз подчеркнуть, что вышесказанное имеет практическое значение только в зонах, где показатель изменяемости конструкции [4] достаточно велик, а именно в местах приложения сосредоточенных сил, в местах заделок, то есть в зонах, имеющих краевые эффекты.

Трехмерную задачу по определению напряженно-деформированного состояния ТК предлагается решать при помощи следующих функций закона распределения деформации заполнителя по нормали, полученных на основе закона о совместности деформации на границах «заполнитель - несущий слой» и построении граничных условий в зонах стыка:

$$w_3(x, y, z) = w_1(x, y)\varphi_1(z) + w_2(x, y)\varphi_2(z);$$

$$u_3(x, y, z) = u_1(x, y)\varphi_3(z) + u_2(x, y)\varphi_4(z) - \frac{1}{2}t_1\left(\frac{\partial w_1(x, y)}{\partial x}\right)\varphi_5(z) + \frac{1}{2}t_2\left(\frac{\partial w_2(x, y)}{\partial x}\right)\varphi_6(z);$$

$$v_3(x, y, z) = v_1(x, y)\varphi_3(z) + v_2(x, y)\varphi_4(z) - \frac{1}{2}t_1\left(\frac{\partial w_1(x, y)}{\partial x}\right)\varphi_5(z) + \frac{1}{2}t_2\left(\frac{\partial w_2(x, y)}{\partial x}\right)\varphi_6(z).$$

где: $\varphi_1 = 0.5 - t_1 z / t_2 z$; $\varphi_2 = 0.5 + t_1 z / t_2 z$;

$$\varphi_3 = \frac{1}{2} - \frac{3z}{2c} + \frac{2z^3}{c^3}; \quad \varphi_4 = \frac{1}{2} + \frac{3z}{2c} - \frac{2z^3}{c^3};$$

$$\varphi_5 = -c \left(1 - 2\frac{t_1}{c} - 2\frac{z\left(1 - 3\frac{t_1}{c}\right)}{c} - 4\frac{z^2}{c^2} + 8\frac{z^3\left(1 - \frac{t_1}{c}\right)}{c^3} \right) / 4t_1;$$

$$\varphi_6 = -c \left(1 - 2\frac{t_2}{c} + 2\frac{z\left(1 - 3\frac{t_2}{c}\right)}{c} - 4\frac{z^2}{c^2} - 8\frac{z^3\left(1 - \frac{t_2}{c}\right)}{c^3} \right) / 4t_2.$$

Здесь искомые функции перемещений несущих слоев $u_1, u_2, v_1, v_2, w_1, w_2$ являются функциями двух переменных x и y , а функции перемещения заполнителя u_3, v_3, w_3 получаются из приведенных выше соотношений.

Предлагаемый закон изменения перемещений в заполнителе и полученные при этом функции $\varphi_1 - \varphi_6$ обеспечивают более точное описание деформации в заполнителе.

Данные функции, в отличие от гипотезы Нойта, учитывают сжатие заполнителя, т.е. сближение несущих слоев и работу на изгиб.

Здесь следует оговориться, что деформация u_i соответствует перемещению в направлении OX , v_i соответствует перемещению в направлении OY , а w_i соответствует перемещению в направлении OZ .

Индексы 1 и 2 соответствуют первому и второму несущим слоям, а индекс 3 - заполнителю (рис.1).

Для вывода уравнений равновесия трехслойных конструкций используем теоремы о минимуме потенциальной энергии. Эта теорема, обладая значительной общностью, позволяет исследовать многие задачи равновесия упругого тела.

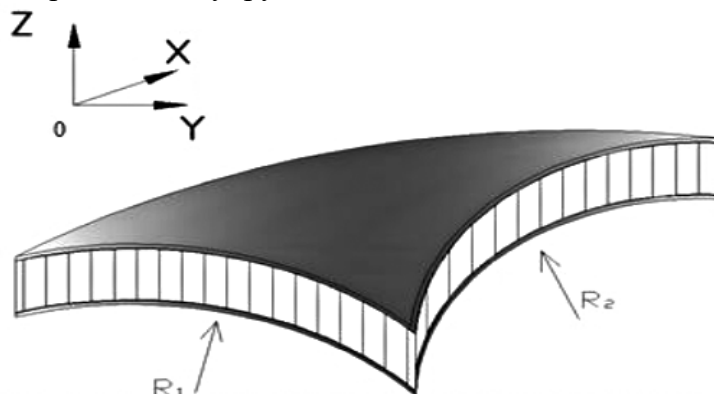


Рис.1. Фрагмент трёхслойной цилиндрической оболочки
 Fig. 1. Fragment of a three-layer cylindrical shell

Обсуждение результатов. Решения, полученные таким методом, не всегда более просты, но в сложных задачах расчета трехслойных оболочек, пластин и балок энергетический прием не только очень удобен, но иногда просто незаменим для получения расчетных зависимостей. Полученные с помощью этого метода уравнения равновесия трехслойной балки (в данной статье в качестве примера принята трехслойная балка) приведены в табл. 1.

Таблица 1. Уравнения равновесия трехслойной балки
Table 1. Equilibrium equations for a three-layer beam

	u_1	u_2	w_1	w_2	
1	$k_1 \frac{\partial^2 u_1}{\partial x^2} + k_2 u_1$	$k_3 \frac{\partial^2 u_2}{\partial x^2} + k_4 u_2$	$k_5 \frac{\partial^3 w_1}{\partial x^3} + k_6 \frac{\partial w_1}{\partial x}$	$k_7 \frac{\partial^3 w_2}{\partial x^3} + k_8 \frac{\partial w_2}{\partial x}$	x^1
2	$k_9 \frac{\partial^2 u_1}{\partial x^2} + k_{10} u_1$	$k_{11} \frac{\partial^2 u_2}{\partial x^2} + k_{12} u_2$	$k_{13} \frac{\partial^3 w_1}{\partial x^3} + k_{14} \frac{\partial w_1}{\partial x}$	$k_{15} \frac{\partial^3 w_2}{\partial x^3} + k_{16} \frac{\partial w_2}{\partial x}$	x^2
3	$k_{17} \frac{\partial^3 u_1}{\partial x^3} + k_{18} \frac{\partial u_1}{\partial x}$	$k_{19} \frac{\partial^3 u_2}{\partial x^3} + k_{20} \frac{\partial u_2}{\partial x}$	$k_{21} \frac{\partial^4 w_1}{\partial x^4} + k_{22} \frac{\partial^2 w_1}{\partial x^2} + k_{23} w_1$	$k_{23} \frac{\partial^4 w_2}{\partial x^4} + k_{24} \frac{\partial^2 w_2}{\partial x^2} + k_{25} w_2$	Z_1
4	$k_{25} \frac{\partial^3 u_1}{\partial x^3} + k_{26} \frac{\partial u_1}{\partial x}$	$k_{27} \frac{\partial^3 u_2}{\partial x^3} + k_{28} \frac{\partial u_2}{\partial x}$	$k_{29} \frac{\partial^4 w_1}{\partial x^4} + k_{30} \frac{\partial^2 w_1}{\partial x^2} + k_{31} w_1$	$k_{31} \frac{\partial^4 w_2}{\partial x^4} + k_{32} \frac{\partial^2 w_2}{\partial x^2} + k_{33} w_2$	Z_2

Выражения k_1 - k_{36} для коэффициентов при уравнениях, здесь не приводятся в силу ограниченности объема статьи, с ними можно ознакомиться в работах [8,10].

Полученные дифференциальные уравнения в частных производных имеют 12-ый порядок и для решения преобразуем их в однородные уравнения 1-го порядка.

Решение полученной системы имеет вид:

$$\begin{aligned}
 a1 &= C_1 e^{\lambda_{1x}} K_1^1 + C_2 e^{\lambda_{2x}} K_1^2 + C_3 e^{\lambda_{3x}} K_1^3 + \dots + C_{12} e^{\lambda_{12x}} K_1^{12} \\
 a2 &= C_1 e^{\lambda_{1x}} K_2^1 + C_2 e^{\lambda_{2x}} K_2^2 + C_3 e^{\lambda_{3x}} K_2^3 + \dots + C_{12} e^{\lambda_{12x}} K_2^{12} \\
 a3 &= C_1 e^{\lambda_{1x}} K_3^1 + C_2 e^{\lambda_{2x}} K_3^2 + C_3 e^{\lambda_{3x}} K_3^3 + \dots + C_{12} e^{\lambda_{12x}} K_3^{12} \\
 &\dots \dots \dots \\
 a12 &= C_1 e^{\lambda_{1x}} K_{12}^1 + C_2 e^{\lambda_{2x}} K_{12}^2 + C_3 e^{\lambda_{3x}} K_{12}^3 + \dots + C_{12} e^{\lambda_{12x}} K_{12}^{12}
 \end{aligned}$$

Реализуется данное решение с помощью пакета прикладных программ математического моделирования «Maple 5.4».

В качестве примера принята трехслойная балка со следующими параметрами: $L = 50$ см; $c = 4$ см; $b = 4$ см; t_1 - толщина верхнего несущего слоя; t_2 - толщина нижнего несущего слоя; материал несущих слоев и заполнителя - АМГ6М (заполнитель дискретный).

Балка защемленная, нагрузка равномерно распределенная. При расчете напряженного состояния трехслойной конструкции менялись приведенные характеристики модуля упругости и модуля сдвига заполнителя. Результаты расчетов приведены на рис. 2-4.

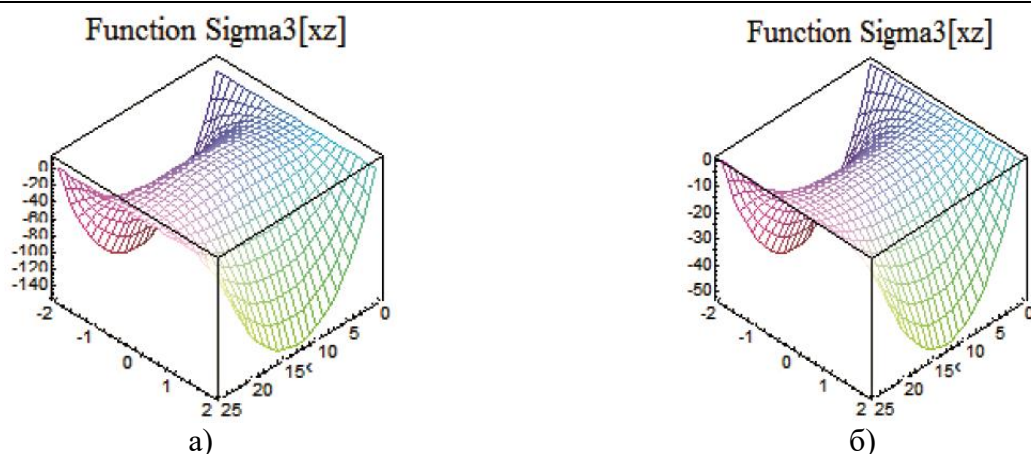


Рис.2. Нормальные напряжения в заполнителе по оси OX (на рис. 2а приведена напряжения при приведенном модуле упругости заполнителя $E_{xz}=2000\text{кг/см}^2$, на рис.2б приведена напряжения при приведенном модуле упругости заполнителя $E_{xz}=15000\text{кг/см}^2$).

Fig. 2. Normal stresses in the filler along the OX axis (Fig. 2a shows the stresses at the reduced elastic modulus of the filler $E_{xz} = 2000 \text{ kg / cm}^2$, Fig. 2b shows the stress at the reduced elastic modulus of the filler $E_{xz} = 15000 \text{ kg / cm}^2$).

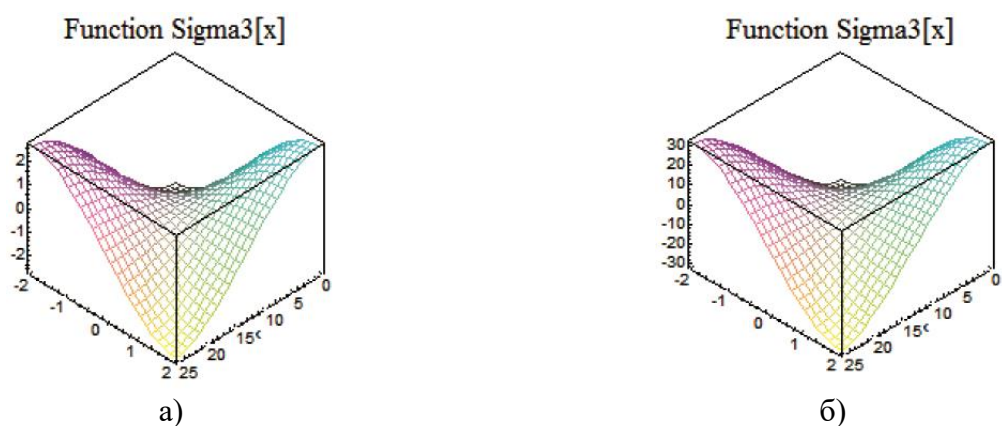


Рис.3. Нормальные напряжения в заполнителе по ос OZ (на рис. 3а приведена напряжения при приведенном модуле упругости заполнителя $E_{xz}=3000\text{кг/см}^2$, на рис. 3б приведена напряжения при приведенном модуле упругости заполнителя $E_{xz}=30000\text{кг/см}^2$).

Fig. 3. Normal stresses in the filler along axis OZ (Fig. 3a shows the stresses at the reduced elastic modulus of the filler $E_{xz} = 3000 \text{ kg / cm}^2$, Fig. 3b shows the stresses at the reduced elastic modulus of the filler $E_{xz} = 30000 \text{ kg / cm}^2$).

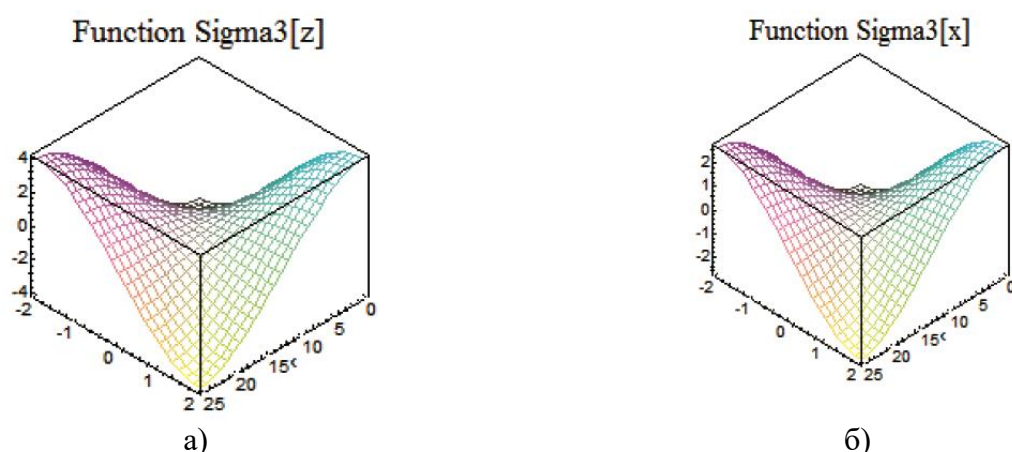


Рис.4. Касательные напряжения в заполнителе в плоскости ZX (на рис. 4а приведены касательные напряжения при приведенном модуле сдвига заполнителя $G_{xz}=1500\text{кг/см}^2$, на рис. 4б приведены касательные напряжения при приведенном модуле сдвиге $G_{xz}=4500\text{кг/см}^2$).

Fig. 4. Shear stresses in the filler in the ZX plane (Fig.4a shows shear stresses at a reduced shear modulus of the filler $G_{xz} = 1500 \text{ kg / cm}^2$, Fig.4b shows shear stresses at a reduced shear modulus $G_{xz} = 4500 \text{ kg / cm}^2$).

Вывод. Как видно из графиков, работа заполнителя в направлении оси ОХ имеет определенное значение, которое влияет на общее напряженное состояние трехслойной конструкции (в существующих гипотезах оно равно нулю).

Увеличение приведенных характеристик дискретного заполнителя повышает эту составляющую напряжений в направлении оси ОХ, при соблюдении условия (1). Это говорит о том, что заполнитель воспринимает значительную долю всей энергии, затрачиваемой на деформацию трехслойной конструкции.

При увеличении приведенного модуля упругости заполнителя - E_{xz} в 7,5 раза напряжение $\sigma_{z(x)}$ увеличивается 15 раз. Это говорит о необходимости учета таких напряжений.

Библиографический список:

1. Александров А.Я., Трофимов Э.П. Местная устойчивость трехслойных пластин с сотовым заполнителем при продольном сжатии// Расчеты элементов авиационных конструкций. М.: Машиностроение, Т.4, 1965. С.3-72.
2. Болотин В.В. К теории слоистых плит// Изв. АН СССР. Механика и машиностроение. М., 1963. №3, с. 65-72.
3. Болотин В.В., Новичков Ю.Н. Механика многослойных конструкций// М.: Машиностроение, 1980. 375с.
4. Григолюк Э.И., Ложкин О.Б. Осесимметричный краевой эффект в несущих многослойных оболочках вращения// Советская прикладная механика, 11(6), 1975. С. 582-589.
5. Григолюк Э.И. /Уравнения трехслойных оболочек с легким заполнителем// Изв. АН СССР. СТН, №1, 1957.
6. Кобелев В.Н., Устарханов О.М., Батдалов М.М. Учет нелинейности деформирования несущих слоев при расчете трехслойных цилиндрических оболочек// Некоторые проблемы создания прогрессивной техники и технологии производства. Махачкала, 1998. С.65-67.
7. Кобелев В.Н., Потопахин В.А. Динамика многослойных оболочек// Ростов. Изд-ва. Ростовского университета, 1985. 160с.
8. Муселемов Х. М. Напряженно-деформированное состояние трёхслойных балок с учётом влияния клеевого шва и температуры: Дисс. . . канд. техн. наук. Махачкала, 2013.
9. Панин В.Ф., Гладков Ю.А. Конструкции с заполнителем: Справочник. М.: Машиностроение, 1991. 271с.
10. Устарханов О.М. «Вопросы прочности трехслойных конструкций с регулярным дискретным заполнителем»: Дисс. д-ра техн. наук. Ростов-на-Дону. 2000.
11. Gerard G. Torsional instability of a long sandwich cylinder// Proceeding of First National Congress of Applied Mechanics, ASME, 1952 .
12. Reissner E. Finite deflection of sandwich plates// J. Aer. Sci. 15, №7, V.75, 1948. pp.272-275.
13. Reissner E. Finite deflection of sandwich plates// J. Aer. Sci. 15, №2, 1950. pp.423-428.
14. Stein M., Mayers J.A. Small-deflections theory for curved sandwich plates NAGA – Technical Report. 1008, 1951.

References:

1. Aleksandrov A.YA., Trofimov E.P. Mestnaya ustoychivost' trekhslonnykh plastin s sotovym zapolnitelem pri prodol'nom szhatii// Raschety elementov aviatsionnykh konstruksiy. M.: Mashinostroyeniye, T.4, 1965. S.3-72. [Aleksandrov A.Ya., Trofimov E.P. Local stability of three-layer plates with honeycomb filler under longitudinal compression // Calculations of elements of aviation structures. M.: Mechanical Engineering, Vol. 4, 1965. pp. 3-72. (In Russ)]
2. Bolotin V.V. K teorii sloistyykh plit// Izv. AN SSSR. Mekhanika i mashinostroyeniye. M., 1963. №3, s. 65-72. [Bolotin V.V. On the theory of layered plates // Izv. Academy of Sciences of the USSR. Mechanics and mechanical engineering. M., 1963. No. 3, pp. 65-72. (In Russ)]
3. Bolotin V.V., Novichkov YU.N. Mekhanika mnogoslonykh konstruksiy// M.: Mashinostroyeniye, 1980. 375s. [Bolotin V.V., Novichkov Yu.N. Mechanics of multilayer structures // M.: Mashinostroyeniye, 1980.375p. (In Russ)]
4. Grigolyuk E.I., Lozhkin O.B. Osesimmetrichnyy krayevoy effekt v nesushchikh mnogoslonykh obolochkakh vrashcheniya// Sovetskaya prikladnaya mekhanika, 11(6), 1975. S. 582-589. [Grigolyuk E.I., Lozhkin O.B. Axisymmetric edge effect in load-bearing multilayer shells of revolution // Soviet Applied Mechanics, 11 (6), 1975. pp. 582-589. (In Russ)]
5. Grigolyuk E.I. /Uravneniya trekhslonnykh obolochek s legkim zapolnitelem// Izv. AN SSSR. STN, №1, 1957 [Grigolyuk E.I. / Equations of three-layer shells with a light filler // Izv. Academy of Sciences of the USSR. STN, No. 1, 1957. (In Russ)]
6. Kobelev V.N., Ustarkhanov O.M., Batdalov M.M. Uchet nelineynosti deformirovaniya nesushchikh sloyev pri raschete trekhslonnykh tsilindricheskikh obolochek// Nekotoryye problemy sozdaniya progressivnoy tekhniki i

- tekhnologii proizvodstva. Makhachkala, 1998. S.65-67. [Kobelev V.N., Ustarkhanov O.M., Batdalov M.M. Taking into account the nonlinearity of the deformation of the bearing layers when calculating three-layer cylindrical shells // Some problems of creating progressive equipment and production technology. Makhachkala, 1998.pp. 65-67. (In Russ)]
7. Kobelev V.N., Potopakhin V.A. Dinamika mnogosloynnykh obolochek// Rostov. Izd-va. Rostovskogo universiteta, 1985. 160s. [Kobelev V.N., Potopakhin V.A. Dynamics of multilayer shells // Rostov. Publishing house. Rostov University, 1985.160p. (In Russ)]
 8. Muselemov KH. M. Napryazhenno-deformirovannoye sostoyaniye trokhsloynnykh balok s uchotom vliyaniya kleyevogo shva i temperatury: Diss. . kand. tekhn. nauk. Makhachkala, 2013. [Muselemov Kh. M. Stress-strain state of three-layer beams taking into account the effect of the glue seam and temperature: Diss. Cand. tech. sciences. Makhachkala, 2013. (In Russ)]
 9. Panin V.F., Gladkov YU.A. Konstruktsii s zapolnitelem: Spravochnik. M.: Mashinostroyeniye, 1991. 271s. [Panin V.F., Gladkov Yu.A. Placeholder constructs: Reference. M.: Mechanical Engineering, 1991. 271p. (In Russ)]
 10. Ustarkhanov O.M. «Voprosy prochnosti trekhsloynnykh konstruktsey s regulyarnym diskretnym zapolnitelem»: Diss. d-ra tekhn nauk. Rostov-na-Donu. 2000. [Ustarkhanov O.M. "Problems of strength of three-layer structures with a regular discrete filler": Diss. Doctor of Technical Sciences. Rostov-on-Don. 2000. (In Russ)]
 11. Gerard G. Torsional instability of a long sandwich cylinder // Proceeding of First National Congress of Applied Mechanics, ASME, 1952.
 12. Reissner, E. Finite deflection of sandwich plates, J. Aer. Sci. 15, No. 7, V.75, 1948. pp. 272-275.
 13. Reissner, E. Finite deflection of sandwich plates, J. Aer. Sci. 15, No. 2, 1950. pp. 423-428.
 14. Stein M., Mayers J.A. Small-deflections theory for curved sandwich plates NAGA - Technical Report. 1008, 1951.

Сведения об авторах:

Устарханов Осман Магомедович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Строительные конструкции и гидротехнические сооружения»; hairulla213@mail.ru

Муселемов Хайрулла Магомедмурадович, кандидат технических наук, доцент, кафедра «Строительные конструкции и гидротехнические сооружения»; hairulla213@mail.ru

Гаппаров Хизри Микдадович, аспирант, кафедра «Строительные материалы и инженерные сети»; 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

Khizri M. Gapparov, Postgraduate Student, Department of Building Materials and Engineering Networks, e-mail: hairulla213@mail.ru

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 12.04.2021.

Принята в печать 19.05.2021.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 12.04.2021.

Accepted for publication 19.05.2021.

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 Microsoft Word. 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 Microsoft Word 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
- 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 Microsoft Word 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 Microsoft Word, CorelDraw, Microsoft Visio 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, +79280504268

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; +79280504268.

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– №2 – 2021.

HERALD
OF DAGHESTAN STATE TECHNICAL UNIVERSITY. TECHNICAL SCIENCES
Makhachkala, Volume 48, No.2 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 28.07.2021г. Сдано в печать 30.07.2021г.

Формат 60x84 ¹/₈. Гарнитура «Times». Бумага офсетная

Тираж 500. Усл. п.л. 17,0. Уч. изд.л. 17,0.

Заказ № ____

Отпечатано в типографии ООО «Издательство «Лотос»
367018. Республика Дагестан, г. Махачкала, пр-кт Петра I, 61.