



#11 (51), 2019 część 4
Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe
(Warszawa, Polska)
Czasopismo jest zarejestrowane i publikowane w Polsce. W czasopiśmie publikowane są artykuły ze wszystkich dziedzin naukowych. Czasopismo publikowane jest w języku polskim, angielskim, niemieckim i rosyjskim.

Artykuły przyjmowane są do dnia 30 każdego miesiąca.

Częstotliwość: 12 wydań rocznie.

Format - A4, kolorowy druk

Wszystkie artykuły są recenzowane

Każdy autor otrzymuje jeden bezpłatny egzemplarz czasopisma.

Bezpłatny dostęp do wersji elektronicznej czasopisma.

Zespół redakcyjny

Redaktor naczelny - Adam Barczuk

Mikołaj Wiśniewski

Szymon Andrzejewski

Dominik Makowski

Paweł Lewandowski

Rada naukowa

Adam Nowicki (Uniwersytet Warszawski)

Michał Adamczyk (Instytut Stosunków Międzynarodowych)

Peter Cohan (Princeton University)

Mateusz Jabłoński (Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki)

Piotr Michalak (Uniwersytet Warszawski)

Jerzy Czarnecki (Uniwersytet Jagielloński)

Kolub Frennen (University of Tübingen)

Bartosz Wysocki (Instytut Stosunków Międzynarodowych)

Patrick O'Connell (Paris IV Sorbonne)

Maciej Kaczmarczyk (Uniwersytet Warszawski)

#11 (51), 2019 part 4
East European Scientific Journal
(Warsaw, Poland)
The journal is registered and published in Poland. The journal is registered and published in Poland. Articles in all spheres of sciences are published in the journal. Journal is published in **English, German, Polish and Russian.**

Articles are accepted till the 30th day of each month.

Periodicity: 12 issues per year.

Format - A4, color printing

All articles are reviewed

Each author receives one free printed copy of the journal

Free access to the electronic version of journal

Editorial

Editor in chief - Adam Barczuk

Mikołaj Wiśniewski

Szymon Andrzejewski

Dominik Makowski

Paweł Lewandowski

The scientific council

Adam Nowicki (Uniwersytet Warszawski)

Michał Adamczyk (Instytut Stosunków Międzynarodowych)

Peter Cohan (Princeton University)

Mateusz Jabłoński (Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki)

Piotr Michalak (Uniwersytet Warszawski)

Jerzy Czarnecki (Uniwersytet Jagielloński)

Kolub Frennen (University of Tübingen)

Bartosz Wysocki (Instytut Stosunków Międzynarodowych)

Patrick O'Connell (Paris IV Sorbonne)

Maciej Kaczmarczyk (Uniwersytet Warszawski)

**Dawid Kowalik (Politechnika
Krakowska im. Tadeusza Kościuszki)**

**Peter Clarkwood(University College
London)**

**Igor Dziedzic (Polska Akademia
Nauk)**

**Alexander Klimek (Polska Akademia
Nauk)**

**Alexander Rogowski (Uniwersytet
Jagielloński)**

Kehan Schreiner(Hebrew University)

**Bartosz Mazurkiewicz (Politechnika
Krakowska im. Tadeusza Kościuszki)**

**Anthony Maverick(Bar-Ilan
University)**

**Mikołaj Żukowski (Uniwersytet
Warszawski)**

**Mateusz Marszałek (Uniwersytet
Jagielloński)**

**Szymon Matysiak (Polska Akademia
Nauk)**

**Michał Niewiadomski (Instytut
Stosunków Międzynarodowych)**

Redaktor naczelny - Adam Barczuk

**Dawid Kowalik (Politechnika
Krakowska im. Tadeusza Kościuszki)**

**Peter Clarkwood(University College
London)**

**Igor Dziedzic (Polska Akademia
Nauk)**

**Alexander Klimek (Polska Akademia
Nauk)**

**Alexander Rogowski (Uniwersytet
Jagielloński)**

Kehan Schreiner(Hebrew University)

**Bartosz Mazurkiewicz (Politechnika
Krakowska im. Tadeusza Kościuszki)**

**Anthony Maverick(Bar-Ilan
University)**

**Mikołaj Żukowski (Uniwersytet
Warszawski)**

**Mateusz Marszałek (Uniwersytet
Jagielloński)**

**Szymon Matysiak (Polska Akademia
Nauk)**

**Michał Niewiadomski (Instytut
Stosunków Międzynarodowych)**

Editor in chief - Adam Barczuk

1000 kopii.

**Wydrukowano w «Aleje Jerozolimskie
85/21, 02-001 Warszawa, Polska»**

**Wschodnioeuropejskie Czasopismo
Naukowe**

**Aleje Jerozolimskie 85/21, 02-001
Warszawa, Polska**

E-mail: info@eesa-journal.com ,

<http://eesa-journal.com/>

1000 copies.

**Printed in the "Jerozolimskie 85/21, 02-
001 Warsaw, Poland»**

East European Scientific Journal

**Jerozolimskie 85/21, 02-001 Warsaw,
Poland**

E-mail: info@eesa-journal.com ,

<http://eesa-journal.com/>

СОДЕРЖАНИЕ

АРХИТЕКТУРА

Коваль Л. М. ОСНОВНИ ЕТАПИ І ТЕНДЕНЦІЇ СВІТЛОВОГО ДИЗАЙНУ В КОНТЕКСТІ РОЗВИТКУ ДЖЕРЕЛ СВІТЛА	4
--	---

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Chirin D.A., Irodov V.F. CREATION MATHEMATICAL MODEL OF A FILM SOLAR COLLECTOR USING EVOLUTIONARY SEARCH ALGORITHM	11
--	----

Sadigov I.R. THE STABILITY OF THIN-WALLED OPEN- PROFILE BARS WITHIN THE NONLINEAR ELASTIC DEFORMATION	17
---	----

Абилов Р. С. РАЗРАБОТКА И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ОТСТОЙНИКА ДЛЯ ГИДРОЭНЕРГЕТИКИ И ИРРИГАЦИИ.....	26
---	----

Аманжулова Ж., Wójcik W., Избаирова А. ПРОБЛЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ДВИЖЕНИЯ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ МАНЕВРОВЫХ РАБОТ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ	30
---	----

Еремеева Ж.В., Капланский Ю.Ю., Воротыло С, Непапушев А.А., Сидоренко Д.А., Хван А.В. МЕХАНОХИМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ НАНОПОРОШКА ГАФНАТА ДИСПРОЗИЯ DY_2HF_5	40
--	----

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

Пешков Н. Ю. РАССЕЯНИЕ ЗВУКОВЫХ ВОЛН В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ ВОЛНОВОДЕ НА ЭЛЛИПСОИДЕ С НЕОДНОРОДНЫМ ПОКРЫТИЕМ	47
--	----

АРХИТЕКТУРА

Koval L.M.

*PhD in Art History, Associate Professor,
Doctorate in the Department of Architectural Structures
Kyiv National University of Construction and Architecture*

MAIN STAGES AND TRENDS OF LIGHTING DESIGN IN THE CONTEXTS OF THE DEVELOPMENT OF LIGHT SOURCES

Коваль Лідія Михайлівна

*кандидат мистецтвознавства, доцент,
докторант кафедри архітектурних конструкцій
Київський національний університет будівництва і архітектури*

ОСНОВНІ ЕТАПИ І ТЕНДЕНЦІЇ СВІТЛОВОГО ДИЗАЙНУ В КОНТЕКСТІ РОЗВИТКУ ДЖЕРЕЛ СВІТЛА

Summary. The article deals with the main stages and trends of light design in the context of the development of light sources. It is established that before starting its separate light design practices, the lighting industry has come a long way of evolution: from non-centralized flame lighting, through gas centralized lighting and the first instances of the introduction of centralized electric lighting to the stages of quantitative and qualitative lighting design. It is also revealed that the major trends in the field of lighting design occur due to the development of light sources. During the flame period the main task for creating sufficient levels of illumination was to ensure that a large number of poorly performing single light sources (candles) were grouped. The design of electric luminaires in the stage of quantitative lighting design (the first half of the twentieth century) is characterized by the focus on the development of luminaires with the use of incandescent lamps in two aesthetic directions. One is restrained and elegant with an emphasis on the functional tasks of lighting; the second direction is lavish and accented on the perception of a luminaire as an object of aesthetic pleasure. At the stage of qualitative lighting design (from the second half of the twentieth century and up to the present time) the design of lighting fixtures is characterized by experiments with different light sources (halogen, fluorescent lamps, neon, LEDs) and the perception of lighting fixtures as components of a single lighting system blurring the line between a separate luminaire and lighting system.

Анотація. У статті розглядаються основні етапи і тенденції світлового дизайну в контексті розвитку джерел світла. Встановлено, що перш ніж дати початок окремій проектній практиці зі світлового дизайну, галузь освітлення пройшла тривалий шлях еволюції: від нецентралізованого освітлення полум'ям, газового централізованого освітлення, перших прикладів впровадження централізованого електричного освітлення до етапів кількісного та якісного дизайну освітлення. Також виявлено, що основні тенденції сфери дизайнерського проектування освітлювальних приладів обумовлювалися розвитком джерел світла. У період освітлення полум'ям основним проектним завданням для створення достатніх рівнів освітленості було забезпечення згрупування великої кількості малоефективних одиничних джерел світла (свічок). Для дизайну електричних світильників на етапі кількісного дизайну освітлення (перша половина ХХ ст.) характерним є зосередження на розробці освітлювальних приладів із використанням ламп розжарювання у двох естетичних напрямках: стримано-елегантному, з акцентом на функціональних задачах освітлення, та пишно-декорованому, з акцентом на сприйнятті освітлювального приладу як об'єкта естетичного задоволення. На етапі якісного дизайну освітлення (друга половина ХХ ст. і до теперішнього часу) дизайн освітлювальних приладів характеризується експериментами з різними джерелами світла (галогенні, люмінесцентні лампи, неон, світлодіоди) та сприйняттям освітлювальних приладів як складових єдиної освітлювальної системи, стиранням грані між окремим освітлювальним приладом і освітлювальною системою.

Key words: light sources, flame lighting, electric lighting, qualitative lighting design, quantitative lighting design.

Ключові слова: джерела світла, освітлення полум'ям, електричне освітлення, якісний дизайн освітлення, кількісний дизайн освітлення.

Постановка проблеми. Світловий дизайн є окремою проектною практикою, засоби якої знаходяться в постійній трансформації залежно від технічного розвитку застосовуваних джерел світла. Тому, теоретичне осмислення взаємозв'язку різних етапів світлового дизайну з особливостями проектування освітлювальних приладів на основі

джерела світла, домінуючого в історичному контексті, є актуальним завданням, яке може стати підґрунтям для визначення основних тенденцій сучасного світлового дизайну.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Історія розвитку галузі штучного освітлення частково розглядалася в працях таких закордонних

теоретиків і практиків світлотехніки і світлового дизайну, як Джуль Оксанен (Julle Oksanen) [8], Шарлотта і Пітер Філл (Charlotte & Peter Fiell) [7], Рюдигер Гансландт і Гаральд Хофман (Rüdiger Ganslandt, Harald Hofmann) [9], Ю. Б. Айзенберг [1].

На теренах України досліджувалися окремі аспекти дизайну освітлювальних приладів, а саме: засоби художньої виразності дизайну світильників провідних італійських і німецьких виробників (Погорельчук В. А.) [6]; геометричний аналіз формоутворення освітлювальних приладів та дизайн освітлювальних приладів в аеровокзалах (Кузнецова І. О., Гнатенко О. М.) [2; 3].

Автором статті було коротко окреслено у вигляді тез доповідей на конференціях: основні етапи розвитку світлового дизайну [4], основні тенденції розвитку дизайну світильників [5].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Як показав попередній аналіз, комплексне дослідження основних етапів і тенденцій світлового дизайну в контексті розвитку джерел світла раніше не проводилося.

Мета статті. Метою даної статті є комплексне дослідження основних етапів і тенденцій світлового дизайну в контексті розвитку джерел світла.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні дослідницькі завдання: встановити історичну хронологію розвитку галузі освітлення та формування окремої проектно-практики зі світлового дизайну; виявити основні тенденції дизайнерського проектування освітлювальних приладів, обумовлені розвитком джерел світла.

Викладення основного матеріалу. Розвиток світлового дизайну, як проектно-практики, багато в чому залежить від технологічних властивостей джерел світла. В історії людства тривалий період основним джерелом світла в темний період доби було полум'я вогню – від початку його використання близько 1,5 млн. років тому і до появи перших електричних джерел світла в XVIII ст. *Освітлення полум'ям* удосконалювалося протягом десятків тисяч років, приймаючи різні форми і способи втілення – від *нецентралізованого освітлення полум'ям* з використанням смолоскипів,

олійних ламп та свічок до *газового централізованого освітлення*.

Наслідком руху в напрямку вивчення фотометричних властивостей джерел світла стало заснування в 1913 р. у Берліні СІЕ (Міжнародної комісії з освітлення). Цю подію можна вважати початком етапу *кількісного дизайну освітлення*, коли інженери (світлотехніки) стали активними учасниками освітлювальних товариств та практиками дизайну освітлення, широко застосовуючи інженерно-орієнтовані стандарти і норми освітлення. Разом з тим, архітектори розробляли нові концепції штучного освітлення, застосовуючи свої знання, отримані впродовж тривалого використання денного світла. Зовнішнє штучне освітлення, окрім функціональної видимості об'єктів, забезпечувало театральність, драматичну взаємодію світла і темряви, дозволяло акцентувати увагу на структурі та просторі. Поступово дизайн освітлення вийшов за рамки простого створення рекомендованих рівнів освітленості, формуючи світлову архітектуру, а сценічне (театральне) освітлення та перцептивна психологія багато в чому визначили методи та інструменти створення різноманітних світлових ефектів, сприяючи появі *якісного дизайну освітлення*. Одним з його засновників вважається Річард Келлі (Richard Kelly, 1910–1977), який замінив проблему кількості світла проблемою його індивідуальних якостей та серією функцій: загальним освітленням навколишнього середовища, орієнтованим напрямним світлом та грою яскравості.

Створення в 1969 р. Міжнародної асоціації дизайнерів освітлення (IALD – The International Association of Lighting Designers) зі штаб-квартирою в Чикаго (штат Іллінойс, США) можна вважати початком широкого практичного застосування *якісного дизайну освітлення*.

На основі окремих історичних даних, наведених у працях закордонних дослідників [1; 7; 8; 9], було сформовано таблицю 1, яка коротко відображає загальну хронологію розвитку галузі освітлення, дизайну освітлювальних приладів та появи окремої проектно-практики зі світлового дизайну.

Хронологія розвитку галузі штучного освітлення

Часовий проміжок	Зміни в штучному освітленні
1. Освітлення полум'ям	
1.1. Полум'яне нецентралізоване освітлення	
1,5 млн. років тому	Початок використання вогню людиною випрямленою.
близько 70 тис. років до н. е.	Поява перших світильників, зроблених із мушель або каменів з порожниною, наповненою сухою рослинною речовиною, наприклад, такою як мох, просоченою тваринним жиром.
3 тис. років до н. е.	Поява кам'яних олійних ламп.
VII ст. до н. е.	Початок виготовлення греками керамічних олійних ламп.
XI ст.	Початок виготовлення майстрами Київської Русі мідних і срібних підсвічників та панікадил.
XII ст.	Початок широкого застосовувалися свічок у Київській Русі.
приблизно XIII ст.	В Аравії та Китаї було створено ряд теоретичних робіт щодо впливу оптичних лінз.
кінець XVI ст.	Були створені перші телескопи.
XVII ст.	Поява скляного кришталю в Богемії, що стало початком розвитку свічних кришталевих люстр.
	Виникнення основних теорій про природу світла (корпускулярної – Ньютона і хвильової – Гюйгенса).
	Удосконалення телескопів Галілеєм, Кеплером та Ньютоном; створення мікроскопів та проєкційного обладнання.
	Повідомлення про світлові явища в ртутних барометрах.
у 1663 р.	Створення першого рукотворного електричного світла німецьким фізиком Отто фон Геріке з використанням статичної електрики.
перша половина XVIII ст.	Французький вчений Богуер створив на базі оптики нову наукову дисципліну – фотометрію.
1709 р.	Світлові досліді Френсіса Хауксбі зі статичною електрикою.
1770-і рр.	Експерименти Лавуазьє, завдяки яким стало зрозуміло, що горіння є формою хімічної реакції і залежить від наявності повітря.
1783 р.	Керуючись висновками Лавуазьє, Франсуа Арганг сконструював удосконалену олійну лампу, названу на його честь лампою Арганга.
1785 р.	Пропозиція освітлення маяків за допомогою систем, які містили лампи Арганга та параболічні дзеркала.
кінець XVIII ст.	З'являються люстри з олійними лампами.
	Ефективність газового освітлення продемонстрована в серії проєктів.
1.2. Газове централізоване освітлення	
1792 р.	Вільям Мердок освітив власний будинок газом.
1802 р.	Хамфрі Деві провів свої перші експерименти з освітленням.
1809 р.	Хамфрі Деві удосконалив першу електричну вугільну дугу і наступного року продемонстрував свій новий винахід.
1813 р.	Вестмінстерський міст був освітлений газом.
1816 р.	Газове освітлення вулиць Балтімора.
1820 р.	Вулиці Парижа були освітлені газом.
	Августин Жан Френель розробив композитну систему ступінчастої лінзи та призматичних кілець.
1826 р.	Розробка «вапно-світла» Драммонда на основі термомінесценції.
1834 р.	Вільям Едвардс Стайт розпочав серію експериментів з дуговим освітленням.
1836 р.	Стайт розробив систему, яка дозволила контролювати відстань між вугільними електродами дугової лампи.
початок 1840-х рр.	Жан-Бернард-Леон Фуко запатентував аналогічну систему.
1840 р.	Перша згадка про лампи розжарювання з використанням платиного дроту в статті Вільяма Роберта Гроува.
1841 р.	Фредерік де Молайн розробив аналогічну лампу розжарювання зі спіраллю платиного дроту.
1845 р.	Де Молайн поліпшив свою лампу розжарювання, видаливши якомога більше повітря з її скляної колби.
1846 р.	Стайт виявив, що вугільні стрижні спалюються не так швидко, якщо їх закрити в скляній посудині без доступу вільного повітря.

1848 р.	Стайт освітив Національну галерею в Лондоні за допомогою своєї покращеної дугової лампи, розробленої спільно з Вільямом Петрі. Джозефу Свону вдалося отримати надзвичайно тонкі і гнучкі вугільні спіралі та нитки для ламп розжарювання.
друга половина XIX ст.	Створюються спочатку спеціалізовані майстерні, а потім і фабрики по випуску газових ламп і газових світильників.
1853 р.	Створення Лукасевичем газової лампи, що стало завершальним етапом розвитку олійних ламп.
1854 р.	Створення ламп розжарювання Генріхом Гебелем.
1855 р.	Свон удосконалив свій метод карбонізації і мав можливість робити дуже міцні та високо-еластичні вугільні нитки.
1857 р.	Віктор Серрін представив дугову лампу, яка містила електромагнітний механізм регулювання відстані між електродами.
1865 р.	Герман Спренгел винайшов ртутний вакуумний насос.
2. Централізоване електричне освітлення	
2.1. Перші приклади практичного впровадження	
1870 р.	Зенобе Теофіл Грамме створив свій генератор.
1876 р.	Павло Яблочков розробив свою електричну «свічку».
1877 р.	Вільям Едвард Сойер запатентував систему, яка використовувала паралельні схеми, що регулювали розподіл електроенергії. Сойер створив компанію Electric-Dynamic Light.
1878 р.	Фрідріх Хефнер-Альтенек розробив дугову лампу, енергетична стабільність якої забезпечувалася електромагнітною системою.
	Чарльз Брюш розробив свою систему, яка регулювала відстань між електродами дугової лампи.
	Перша демонстрація практичної лампи розжарювання Свона.
1879 р.	Томас Едісон отримав патент на лампу розжарювання і запустив її масове виробництво.
1880-і рр.	«Свічка» Яблочкова стала першою дуговою лампою, яка використовувалася у великій кількості.
1880 р.	Едісон і Свон стали партнерами і заснували компанію Edison & Swan United Lamp, яка згодом стала відома як Ediswan.
початок 1880-х рр.	Компанія Едісона встановила свою першу комерційну систему освітлення (115 мерехтливих вогнів) на пароплаві SS Columbia.
1882 р.	Компанією Едісона було створено першу в світі систему електропостачання для внутрішнього використання.
1890 р.	Карл Ауер фон Велсбах запропонував практичний спосіб використання термолюмінесценції, чим було досягнуто оптимуму в області газового освітлення.
1892 р.	Виготовлено понад сім мільйонів ламп розжарювання.
1893 р.	Вільям Жандас створив дугову лампу, що працювала від 80 вольт.
кінець XIX ст.	Невдала спроба забезпечити вуличне освітлення за допомогою встановлення прожекторів на світлові вежі.
	Поява світильників ар-нуво (Art Nouveau).
кінець XIX – початок XX ст.	Сконструйовані і введені в широке застосування перші дійсно функціональні розрядні лампи, однією з них була лампа Мура.
2.2. Розвиток кількісного дизайну освітлення	
1900 р.	Перші кроки з формування міжнародного органу по світловим вимірюванням.
1903 р.	Заснована CIP – попередниця CIE.
1908р.	Розробка Петером Беренсом утилітарних світильників для AEG.
1913 р.	У Берліні заснована CIE (Міжнародна комісія з освітлення).
1916 р.	Перше письмове пояснення «спектральної чутливості».
1920-і рр.	Визнання електричного світла як нового «будівельного матеріалу».
	Створено ряд концепцій скляної архітектури, в яких будівлі, після настання темряви, набували вигляду самосвітних структур.
1920–1930-і рр.	Об'єднання рухом De Stijl і Баухаусом ідей модернізму з освітлювальними рішеннями для широкомасштабного виробництва.

1930-і рр.	Піднесення розкішного стилю ар-деко (Art Deco).
1931 р.	CIE представила міжнародну триколірну колориметричну систему, відому під назвою «CIE System».
1940-і рр.	Стиль New Look у дизайні світильників.
1950-і рр.	Річард Келлі визначив відмінності між основними функціями освітлення.
1960-і рр.	Прийняття рішення заснувати Міжнародну асоціацію дизайнерів освітлення (IALD).
1962 р.	Розробка Ніком Холоньяком першого світловипромінювального діода (LED) видимого спектра.
2.3. Розвиток якісного дизайну освітлення	
1969 р.	Засновано IALD зі штаб-квартирою в Чикаго, штат Іллінойс, США.
1960-і – початок 1970-х рр.	Дизайнери почали експериментувати з різними джерелами світла, такими, як галогенні, люмінесцентні лампи та неон.
1973 р.	Розробка General Electric енергозберігаючої компактної люмінесцентної лампи (КЛЛ).
середина – кінець 1970-х рр.	Здебільшого, освітлення характеризувалося раціональним підходом, з'явився короткочасний стиль High-Tech.
кінець 1970-х – початок 1980-х рр.	Велика кількість дизайнерів змінила традиційний підхід до проектування на радикальну програму Анти-дизайн (Anti-Design).
1980-і рр.	Використовуючи значно удосконалені технічні аспекти освітлення, дизайнери вільно вивчали ідею освітлення як метафори.
1990-і рр.	Впровадження CDM (керамічних розрядних ртутних) ламп.
1994 р.	Компанія Philips представила компактні люмінесцентні лампи (КЛЛ) New Generation TL, після чого КЛЛ стали широко застосовуватися.
середина 1990-х рр.	Новий тип освітлення, яке пропонувало варіативні ступені яскравості та відтінків світла відповідно до настрою користувача.
кінець 1990-х рр. з 2000 р.	Початок розробки систем, які імітували природні коливання денного світла. Стрімкий розвиток світлодіодних освітлювальних приладів.

Таблиця 1 наглядно демонструє певні характерні особливості, властиві взаємодії періодів застосування різних джерел світла в контексті розвитку дизайну освітлення, а саме:

- Перші приклади практичного впровадження електричного освітлення співпадають у часі з піком розвитку і удосконалення газового освітлення, а розвиток газового централізованого освітлення – з піком удосконалення олійних ламп.

- Постійні експерименти з трьома формами електричного освітлення (лампи розжарювання, дугові та розрядні лампи) систематично проводилися з початку XIX ст., паралельно з завершальними удосконаленнями в галузі освітлення полум'ям.

- Наявність ідеї централізованості освітлення, що на момент появи перших ефективних джерел електричного світла вже була успішно реалізована в галузі освітлення газового, пришвидшила розвиток електричного освітлення, яке майже з самого початку свого практичного застосування було централізованим.

- Етап кількісного дизайну освітлення і перші кроки з формування міжнародного органу зі світлових вимірювань спочатку стосувалися газового освітлення, а вже згодом – електричного.

- Етап якісного дизайну освітлення триває до теперішнього часу.

На сьогодні, освітлювальна промисловість продовжує досліджувати та розробляти нові джерела світла, але подальший прогрес

освітлювальної галузі залежить як від розвитку джерел світла, так і від способів та шляхів їх застосування. Освітлювальні прилади (світильники) є матеріальними об'єктами, які забезпечують зв'язок джерел світла із комплексним проектуванням освітлення. Тому, саме в дизайні світильників яскраво відображається його обумовленість типом застосованих джерел. Зважаючи на це, доречно детально розглянути історичні особливості дизайну світильників.

Вважається, що перші світильники з'явилися близько 70 тис. років до н. е. і були зроблені із мушель або каменів з порожниною, наповненою сухою рослинною речовиною, наприклад, такою як мох, просоченою тваринним жиром. Близько 3 тис. років до н. е. почали з'являтися кам'яні олійні лампи, а вже в VII ст. до н.е. греки виготовляли керамічні олійні лампи на заміну ручних смолоскипів. У римський період олійні лампи з формованої глини, часто прикрашені сценами полювання, почали виготовлятися серійно. Протягом наступних двох тисяч років для штучного освітлення використовувались свічки, ліхтарі і олійні лампи, виготовлені з кераміки, каменю або металу [7, с. 8–10].

У Київській Русі широке застосування свічок (спочатку сальних, потім воскових, стеаринових і парафінових) почалося з XII ст. Найпоширенішим засобом їх установки були підсвічники, для виготовлення яких використовувалися дерево, кістка, скло і порцеляна, міцний вогнетривкий метал. Також, з розвитком ливарної справи, у

Київській Русі ще з XI ст. почали виготовляти мідні і срібні підсвічники та панікадила, які застосовувалися переважно в церквах, палацах і будинках заможних людей, мали складну обробку з використанням рельєфного різьблення, художнього лиття, цінних матеріалів, розпису, позолоти. На свята застосовувалися ліхтарі, які декорувалися з особливою пишністю, звичайно мали шестигранну форму зі слюдяними стінками, які захищали полум'я свічки від вітру [1, с. 12–14].

Більшість освітлювальних приладів з XVI до XVIII ст., маючи різноманітні конструкції, функціонально були призначені для встановлення і тримання великої кількості свічок з метою забезпечення достатнього рівня освітленості. Це, у свою чергу, вимагало створення великих підвісних світильників і вирішення складного завдання композиційного поєднання в єдине ціле розрізаних світлових плям окремих свічок. Створення єдиного світлового об'єму світильника забезпечувалося шляхом використання різноманітного декоративного скла і насамперед кристалу, тому на розвиток освітлювальних приладів значно вплинув розвиток виробництва скла. В якості основного матеріалу скло вперше використано у венеціанських свічних люстрах, пізніше виготовляються свічні люстри з використанням гранованого скляного кристалу (вперше з'явився в Богемії в XVII ст.). Залежно від напрямку спостереження рухливе полум'я свічки в поєднанні з кристалом створювало різні візуальні ефекти. Кристаль грав світлом, злегка коливаючись під впливом висхідних потоків теплого повітря, поєднуючи в єдину композицію світло окремих свічок [1, с. 12–17]. Характерні особливості світлового розподілу свічних кристалемих люстр і досі використовуються сучасними дизайнерами освітлення для створення емоційно яскравих світлових рішень і ефектів, але вже із застосуванням сучасних джерел світла.

У 1783 р. Франсуа Арганд (François Argand) сконструював олійну лампу, яка була названа на його честь лампою Арганда. Вона мала покращену подачу кисню та розширену поверхню гнота, що сприяло значному підвищенню світлової ефективності. Наступним кроком стало оточення полум'я скляним циліндром (лампове скло), що захищало його від впливу повітряних потоків, а також створювало тягу і зменшувало кіптяву. Незабаром, лампа Арганда знайшла широке застосування як для домашнього освітлення, так і для освітлення вулиць, сценічного освітлення, у сфері оповіщення (для маяків) [9, с. 13–16].

З кінця XVIII ст. з'являються люстри з олійними лампами. У цих світильниках резервуар із в'язкими оліями розміщувався вище пальників, що забезпечувало приток пального до гноту. Завершальним етапом розвитку олійних ламп стало створення Ігнатієм Лукасевичем у 1853 р. газової лампи, яка принципово відрізнялася від попередніх олійних ламп розміщенням резервуара нижче пальника, що стало можливим завдяки легкості вбирання гасу гнотом. Ця лампа також отримала широке застосування [1, с. 17].

З появою електричного освітлення, починаючи з кінця XIX і протягом першої половини XX ст., увага була зосереджена або на створенні функціональних освітлювальних рішень, або на дослідженнях експресивного потенціалу електричного світла, завдяки використанню різноманітних природних та синтетичних матеріалів і широкого спектру виробничих технік та технологій. Протягом перших років електрифікації будинків освітлювальні прилади були ексклюзивними, дорогими та трудомісткими у виготовленні. Проте, у міжвоєнний період наслідком великого промислового виробництва стали дизайнерські пошуки більш універсальних та доступних рішень, які мали на меті серійне виробництво. У післявоєнний період почалися активні експерименти з формою. Загалом, для цього періоду розвитку дизайну освітлювальних приладів були характерними наступні тенденції та стильові напрямки [7, с. 6–31]:

- Світильники ар-нуво (Art Nouveau) – створювалися висококваліфікованими майстрами скла та металу, серед яких Вільям Артур Сміт Бенсон (William Arthur Smith Benson), Луїс Комфорт Тіффані (Louis Comfort Tiffany), Еміль Галле (Emile Galle), Йозеф Хофман (Josef Hoffmann).

- Функціоналізм, започаткований Петером Беренсом (Peter Behrens) та Німецьким Веркбундом (Deutscher Werkbund) з 1908 р., був запозичений у 1920–1930 рр. сподвижниками руху De Stijl і дизайнерами Баухаусу (Bauhaus), які об'єднали ідеї модернізму з освітлювальними рішеннями для широкомасштабного виробництва.

- Також, у 1930-х рр. відбувалося піднесення розкішного стилю ар-деко (Art Deco), а такі дизайнери, як Жан Перзел (Jean Perzel) та Рене Лалік (Rene Lalique), створювали декоративні освітлювальні прилади, що містили коштовні матеріали, наприклад, бронзу та алебастр.

- У 1940-х рр. з'явився стиль New Look, дизайнери створювали освітлювальні прилади, на які вплинули тенденції тогочасного образотворчого мистецтва, а також нові матеріали, розроблені під час війни. Цей новий напрямок у дизайні освітлення в основному був започаткований італійськими дизайнерами, зокрема Джіно Сарфатті (Gino Sarfatti).

У першій половині XX ст. для освітлення використовувалися переважно лампи розжарювання і лише в 1960-х і на початку 1970-х рр. почалися експерименти з іншими джерелами світла, такими, як галогенні, люмінесцентні лампи та неон. У цей же період з'явилися нові види пластиків, що розширювали вибір матеріалів, а зростаюче використання синтетичних полімерів мало великий вплив на дизайн освітлення. Значні культурні зрушення цих років транслювалися на експериментальний дизайн усіх напрямків на межі освітлення та мистецтва. Загалом, для цього періоду розвитку дизайну світильників були характерними наступні тенденції та стильові напрямки [7, с. 31–41]:

- Освітлення в 1970-х рр. характеризувалося раціональним підходом і прагненням досягти максимального ефекту за допомогою мінімальних засобів, з'явився короткочасний стиль High-Tech.

- Проте, до кінця 1970-х рр. велика кількість дизайнерів, особливо в Італії, змінили традиційний підхід до промислового дизайну на радикальну програму Анти-дизайн (Anti-Design). Прикладами цього напрямку можуть слугувати експериментальні світильники Алессандро Мендіні (Alessandro Mendini) та Мікеле де Луччі (Michele De Lucchi).

- У 1980-х рр. послідовником дизайну освітлення постмодернізму (Post-Modern) була студія дизайну Мемфіс (Memphis), яка створювала освітлювальні прилади, багаті символами, але недостатньо функціональні.

- Із середини 1990-х рр. такі компанії як Artemide вже вивчали новий тип освітлення, яке пропонувало варіативні ступені яскравості та відтінків світла відповідно до настрою користувача, а наприкінці 1990-х рр. виробники світильників, зокрема Ergo та iGuzzini, почали розробляти системи, які імітували природні коливання денного світла.

- Починаючи з 2000 р. спостерігається безпрецедентний рівень інновацій у галузі освітлення, нові розробки синтетичних матеріалів та нові технології продовжують трансформувати можливості дизайну, а електричне освітлення досягло важливої поворотної точки у своїй еволюції через використання принципово нового типу джерел світла – світлодіодів (LED).

Висновки та пропозиції. Отже, у процесі дослідження встановлено, що перш ніж дати початок окремій проектній практиці зі світлового дизайну, галузь освітлення пройшла тривалий шлях еволюції: від нецентралізованого освітлення полум'ям, газового централізованого освітлення, перших прикладів впровадження централізованого електричного освітлення до етапів кількісного та якісного дизайну освітлення.

Також виявлено, що основні тенденції сфери дизайнерського проектування освітлювальних приладів обумовлювалися розвитком джерел світла:

- У період освітлення полум'ям основним проектним завданням для створення достатніх рівнів освітленості було забезпечення згрупування великої кількості малоефективних одиничних джерел світла (свічок).

- Для дизайну електричних світильників на етапі *кількісного дизайну* освітлення (перша половина ХХ ст.) характерним є зосередження на розробці освітлювальних приладів із використанням ламп розжарювання у двох естетичних напрямках: стримано-елегантному, з акцентом на функціональних задачах освітлення, та пишно-декорованому, з акцентом на сприйнятті освітлювального приладу як об'єкта естетичного задоволення.

- На етапі *якісного дизайну освітлення* (друга половина ХХ ст. і до теперішнього часу)

дизайн освітлювальних приладів характеризується експериментами з різними джерелами світла (галогенні, люмінесцентні лампи, неон, світлодіоди) та сприйняттям освітлювальних приладів як складових єдиної освітлювальної системи, стиранням грані між окремим освітлювальним приладом і освітлювальною системою.

Список літератури:

1. Айзенберг Ю. Б. Световые приборы : учеб. для электротехнических техникумов // Москва: Энергия, 1980. – 464 с.

2. Кузнецова І.О., Гнатенко О.М. Геометричний аналіз формоутворення освітлювальних приладів (на базі EUROLUCE 2009) / Технічна естетика і дизайн: зб. наук. праць. – К.: Віпол, 2009. – Вип.6. – С. 50–55.

3. Кузнецова І.О., Гнатенко О.М. Дизайн освітлювальних приладів в аеровокзалах / Авіа – 2009: IX міжнар. наук.-техніч. конф., 21-23 вересня 2009 р.: тези доп. – К., 2009 – Т.3. – С. 20.72-20.75.

4. Коваль Л. М. Основні етапи розвитку світлового дизайну / Л. М. Коваль // Актуальні проблеми світлотехніки : матеріали VII Міжнародної науково-технічної конференції в рамках Світлотехнічного міжнародного форуму «LIGHT FORUM'2019» (14–16 травня 2019 р., Харків) – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. – С. 68–69.

5. Коваль Л. М. Основні тенденції розвитку дизайну світильників / Л. М. Коваль // Модернізація та наукові дослідження: інтеграція науки та практики. Матеріали науково-практичної конференції (м. Одеса, 26-27 липня 2019 року). – Херсон : Видавництво «Молодий вчений», 2019. – С. 16–20.

6. Погорельчук В.А. Дизайн світильників провідних італійських і німецьких виробників: засоби художньої виразності та перспективи використання досвіду в Україні : дис. канд. мистецтвознавства : 17.00.07 / Погорельчук Володимир Анатолійович – Х. : ХДАДМ, 2010. – 263 с.

7. Charlotte & Peter Fiell. 1000 Lights // Köln: TASCHEN GmbH, 2013. – 639 p.

8. Julle Oksanen. Design Concepts in Architectural Outdoor Lighting Design Based on Metaphors as a Heuristic Tool [Electronic resource] / Aalto University publication series Doctoral Dissertations 73/2017 – Helsinki, Finland : Aalto University School of Arts, Design and Architecture Department of Architecture Printed by Unigrafia, 2017 – 294 p. – URL: https://shop.aalto.fi/media/filer_public/8b/25/8b253f49-c052-4249-b518-5f754dd199b5/oksanen_verkkoversio.pdf

9. Rüdiger Ganslandt, Harald Hofmann. Handbook of Lighting Design. ERCO Leuchten GmbH, Lüdenschied Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig // Wiesbaden, 1. Edition, 1992. – 289 p.

Chirin D.A.

postgraduate student

Prydniprovskaya State Academy of
Civil Engineering and Architecture

Irodov V.F.

doctor of engineering, professor,

Prydniprovskaya State Academy of
Civil Engineering and Architecture

CREATION MATHEMATICAL MODEL OF A FILM SOLAR COLLECTOR USING EVOLUTIONARY SEARCH ALGORITHM

Abstract. The construction of a mathematical model of a film solar collector based on an evolutionary search algorithm is considered. The aim of the work is to build a mathematical model based on a limited set of experimental data from a range of permissible parameters. The dimensionless complexes characterizing the work of the collector are used. The total array of experimental data is divided into two arrays - a training sequence and a test sequence. As a criterion for the adequacy of the model, the criterion of the minimum deviation of the simulation values from the experimental data was used. The model was built on the points of the training sequence and tested on the test. As an example, a numerical solution to the problem of optimizing the work of the collector is shown under restrictions on permissible parameters. To solve the problem of constructing a model and the optimization problem, an evolutionary search algorithm was used.

Keywords: solar collector, heating systems, hot water systems, experimental studies, evolutionary algorithms, dimensionless appearance, math search.

Introduction

To create complex hot water supply or heating systems based on film solar collectors, it is necessary to have a mathematical model of the collector. The resulting mathematical model should be as close as possible to the physical model in a variety of parameters, which is necessary for further research and

construction of a mathematical model of a common hot water supply and heating system. Film solar collectors are attracted by their simplicity of construction and the corresponding low cost. One of the possible designs of film solar collector is available in the technical solution [1].

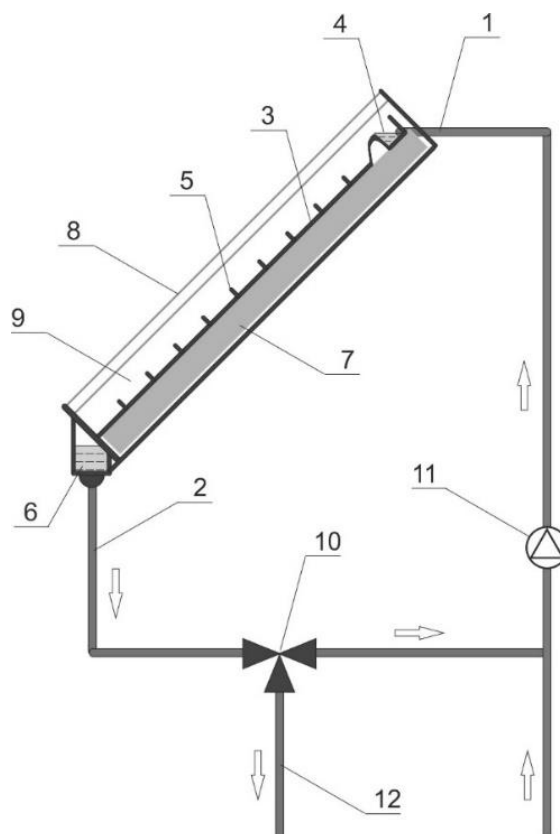


Fig. 1 Design of solar collector.

- 1) liquid inlet;
- 2) liquid outlet;
- 3) heat exchange surface;
- 4) slit liquid dispenser;
- 5) protrusions on the surface;
- 6) fluid storage;
- 7) thermal insulation material;
- 8) translucent surface;
- 9) air gap;
- 10) three-way valve;
- 11) fluid pump;
- 12) exit from the collector;

The article [2] describes the experimental technique for this collector and gives experimental results. In this paper, the task was to construct a mathematical model of film solar collector based on experiments [2].

Table 1.

The results of the experiment with a solar film collector.

Input parameters						Output parameters		
Tн.вод.	Tк.вод.	Tпов.	H	h	Рсон.	G	Qвод	Qкн.
24,5	27,7	30,97	57	2	99,999	6,67	64	199,998
24,3	28,4	30,71	57	2	98,862	6,67	82	197,724
24,5	28,6	31,33	57	1	88,161	6,67	82	176,322
24,7	29,3	31,16	57	1	100,491	6,67	92	200,982
26	29,5	28,87	57	1	107,467	6,67	70	214,934
26,2	30	29,39	57	1	97,374	6,67	76	194,748
26,9	31,8	29,22	37	1	100,465	5	98	200,93
27,1	32,2	29,3	37	1	101,282	5	102	202,564
27,5	32,7	30,09	37	2	91,177	5	104	182,354
27,7	32,9	30,71	37	2	98,862	5	104	197,724
27,8	32,1	28,26	37	2	74,74	5	86	149,48
27,1	34,8	30,36	21	2	111,016	3,85	154	222,032
27,2	34,4	28,78	21	2	89,27	3,85	144	178,54
27,3	34,8	27,75	21	2	94,154	3,85	150	188,308
27,4	34,4	30,89	21	2	61,763	3,85	140	123,526
27,4	33,6	30,89	21	1	83,502	3,85	124	167,004
27,1	34,8	29,83	21	1	86,186	3,85	154	172,372
27,7	33,9	28,52	21	1	113,943	3,85	124	227,886
28,2	34,6	29,04	21	2	112,004	3,85	128	224,008
28,3	32,9	29,13	21	2	76,28	3,85	92	152,56

де: Tн.вод. (°C) - water temperature at the inlet to the solar collector;

Tк.вод. (°C) - water temperature at the outlet of the solar collector;

Tпов. (°C) - air temperature in the shade;

H (cm) - the difference in the height of the water between the storage tank and the inlet;

h (cm) - the distance between the translucent and the sorption surfaces;

Рсон. (mW/cm²) - intensity of solar radiation;

Qвод. - the amount of energy that came into the collector;

G (gram/sec) - water consumption;

Qкн. (W) - the amount of solar energy supplied to an area equal to the collector area;

As a result of an experiment with film solar collector, three dimensionless complexes of 20 elements were created: p_1 – temperature complex, p_2 – geometric complex, p_3 – complex efficiency of the device [2].

$p_1 = \frac{\Delta T}{T_{пов}}$, where ΔT - the difference in temperatures at the inlet and outlet of the solar collector.

$p_2 = \frac{h^2}{F}$ where h - the distance between the translucent and the sorption surfaces, F - the area of the translucent surface.

$p_3 = \frac{C_{вод} * G * \Delta T}{q_{сон} * F}$ where $C_{вод}$ - water capacity, G - water consumption, $q_{сон}$ - intensity of solar radiation.

Table 2.

Experimental results of film solar collector in the form of dimensionless complexes

№	p_1	p_2	p_3
1	0,130865	0,000435	0,564148
2	0,147625	0,000435	0,555286
3	0,121233	0,000435	0,395074
4	0,129296	0,000435	0,473398
5	0,167693	0,000435	0,443518
6	0,174061	0,000435	0,457897
7	0,200712	0,000435	0,519895
8	0,258129	0,000435	0,625568
9	0,217391	0,000435	0,381
10	0,103326	0,001739	0,388186
11	0,133507	0,001739	0,503084
12	0,172815	0,001739	0,518619
13	0,169326	0,001739	0,478304
14	0,152159	0,001739	0,523173
15	0,253623	0,001739	0,485653
16	0,250174	0,001739	0,564739
17	0,27027	0,001739	0,557755
18	0,226611	0,001739	0,793579
19	0,220386	0,001739	0,400099
20	0,157913	0,001739	0,422248

Formulation of the problem

Based on experimental data, it is necessary to obtain a mathematical model of a film solar collector. We will search for a mathematical model of the solar collector in the form $p_3 = f(p_1, p_2)$, where is the function $f(p_1, p_2)$ characterizes the efficiency of the solar collector. It is necessary to find the type of function $f(p_1, p_2)$, at which the deviation is minimized

$$Z = \sum_{i=1}^n |p_{3i} - f(p_{1i}, p_{2i})| \rightarrow \min \quad (1)$$

where: p_{1i}, p_{2i}, p_{3i} – dimensionless complexes from experimental data.

Solving the problem

Using the experimental results in a dimensionless form Table 2, two-dimensional Fig.2 and three-dimensional diagrams of Fig.3 are constructed.

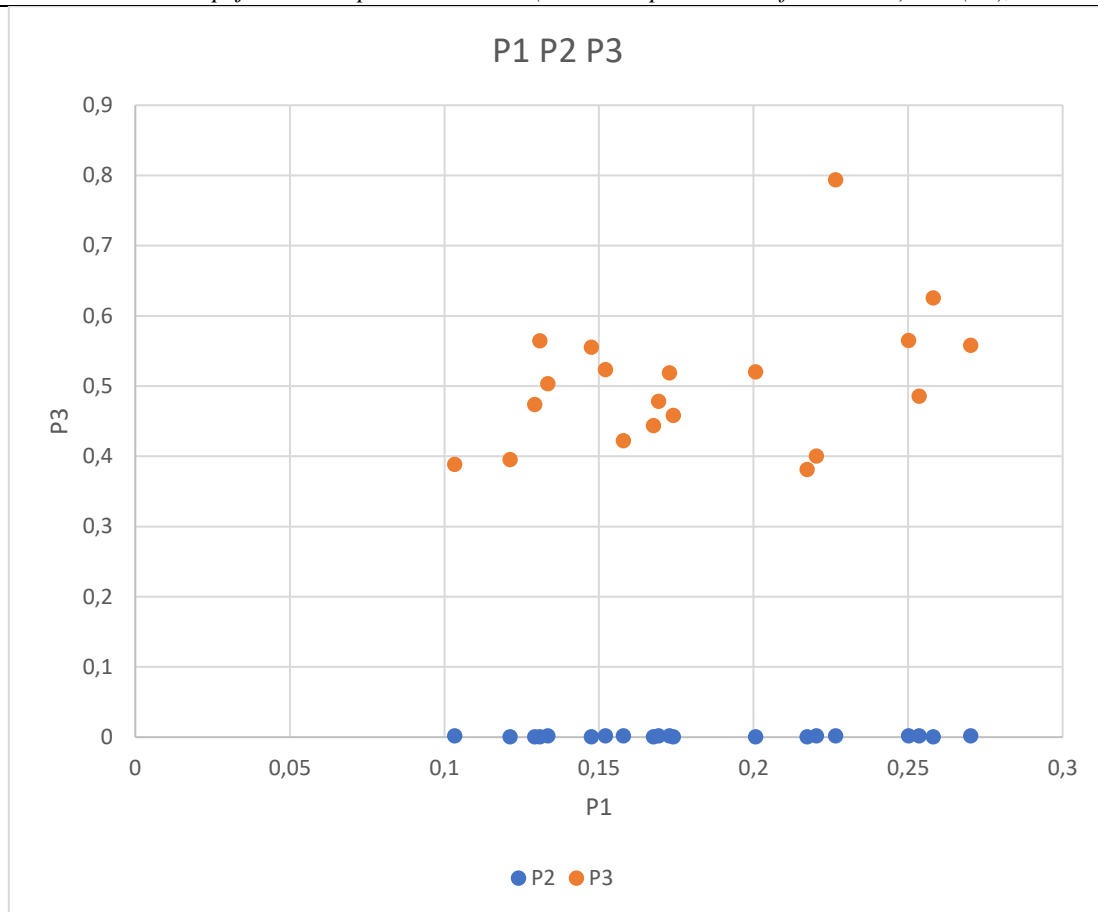


Fig. 2 Two-dimensional diagram of dimensionless complexes p_1, p_2, p_3 .

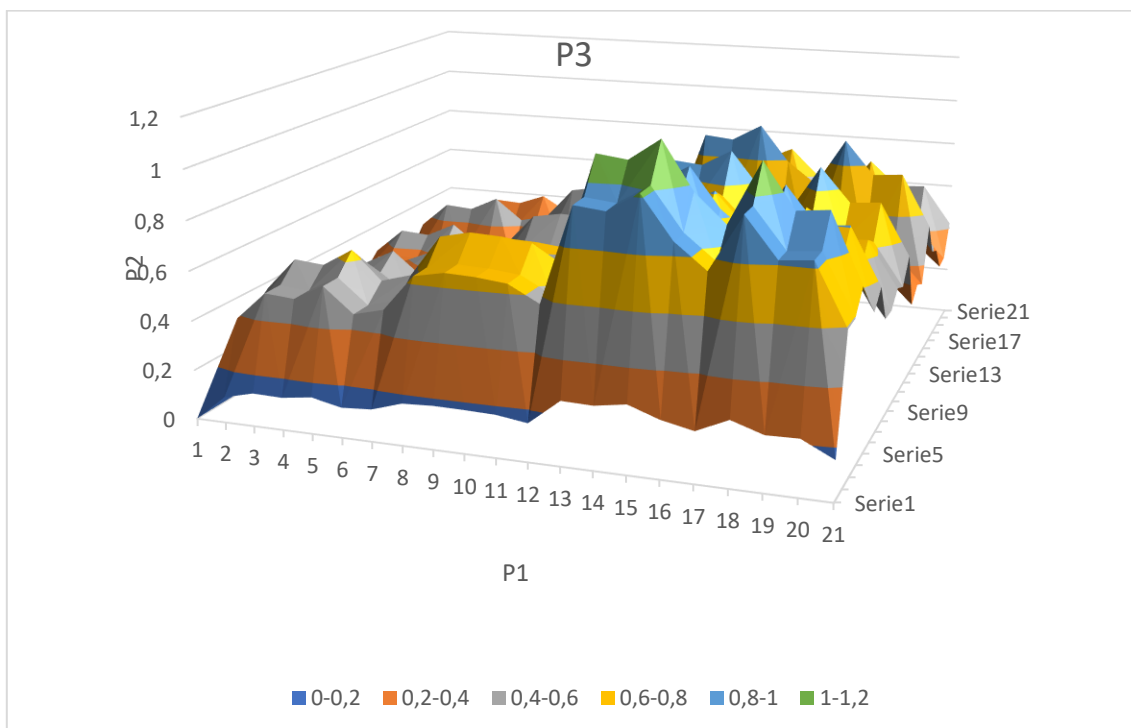


Fig. 3 Three-dimensional diagram of dimensionless complexes p_1, p_2, p_3 .

Subsequently, the type of function was selected that reflects the dependence of p_3 on p_1 and p_2 .

$$f(p_1, p_2) = a_1 + a_2 \cdot p_1 + a_3 \cdot (1 - p_2) + a_4 \cdot p_1^2 + a_5 \cdot (1 - p_2)^2 \tag{2}$$

The numerical coefficients a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 were determined from the minimization condition (1).

To ensure the adequacy of the modeling object, the entire array of experimental data of (Table 1) is divided into an array of the training sequence - points 1,3,5,7,8,9,11,13,15,16,17,19 from table 1 and an array of the check sequence of the points 2,4,6,10,12,14,18,20 from table 1. The coefficients a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 were determined from the minimization condition

$$\sum_{i \in I_0} \frac{|p_{3i} - f(p_{1i}, p_{2i})|}{p_{3i}} \rightarrow \min \quad (3)$$

And then, the constructed model with the found coefficients a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 was checked on a test sequence by calculating

$$\varepsilon_{\Pi} = \frac{1}{n_{\Pi}} \sum_{i \in I_{\Pi}} \frac{|p_{3i} - f(p_{1i}, p_{2i})|}{p_{3i}} \quad (4)$$

where ε_{Π} – relative error of the model on the test sequence.

As a result of the evolutionary search for the coefficients, the function is obtained:

$$f(p_1; p_2) = 0,51 - 0,295 \cdot p_1 + 0,0027 \cdot (1 - p_2) + 3,5 \cdot p_1^2 - 0,23 \cdot (1 - p_2)^2 \quad (5)$$

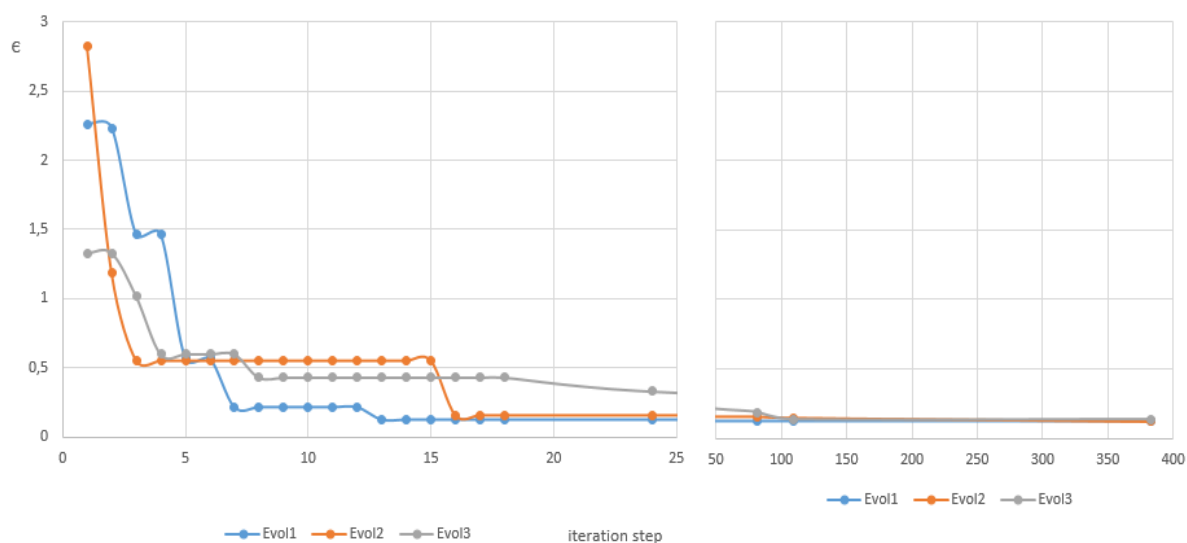


Fig. 4 Graph of convergence of the branches of the evolutionary search according to experimental data.

For many points of the experimental data, the average error of the model is $\varepsilon = 0.1267716$, and for the points of the test sequence, the average error is $\varepsilon = 0.111678$. These results indicate sufficient adequacy of the found model for actual data. The following problem was solved as an example of using the constructed model. It was required to find $f(p_1; p_2) \rightarrow$

max by the evolutionary search method under the conditions:

$$0.1 \leq p_1 \leq 0.3; \\ 0.0017 \leq p_2 \leq 0.0043;$$

Figure 5 shows the evolutionary search for a solution to the indicated optimization problem of a film solar collector.

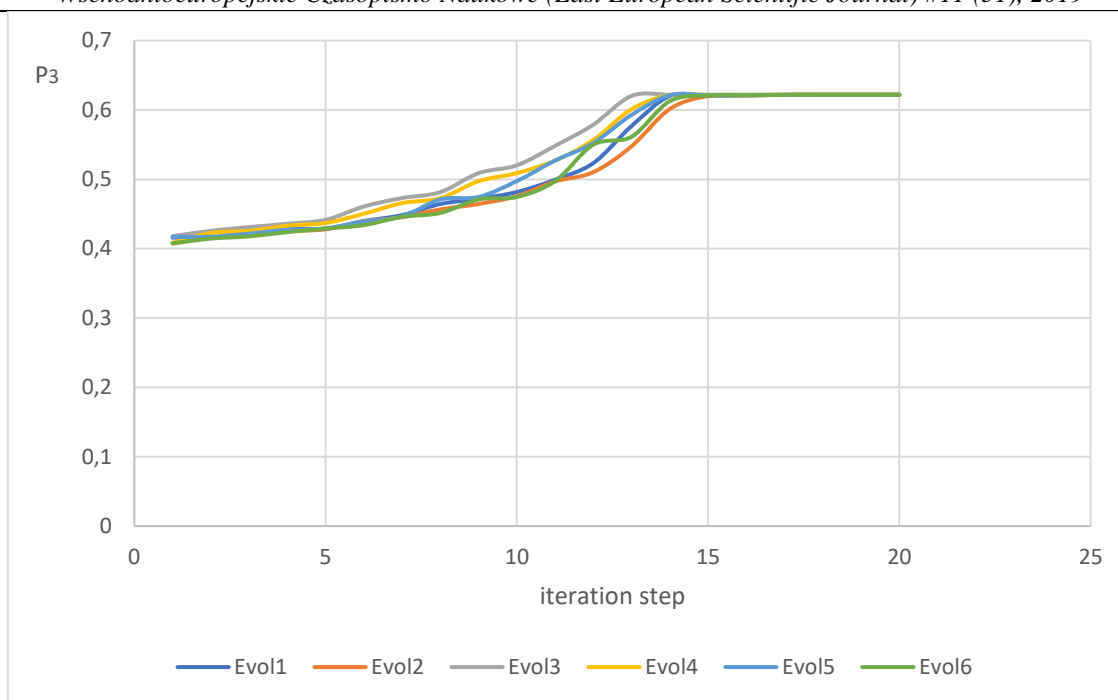


Fig. 5 Graph of the search for points of maximum efficiency of the solar collector, by the method of evolutionary search.

At the 20th step of iteration, a complete match was obtained across all branches of the evolutionary search, with $p_1 = 0.3$; $p_2 = 0.0017$, which corresponds to $\max p_1$ and $\min p_2$ from the allowable range. The value of the function $f(p_1; p_2)$ at these points is 0.62191, i.e. solar collector efficiency 62%.

Conclusions

A mathematical model of the solar collector of the film type is built. An algorithm and program code for evolutionary search is developed, with the help of which the coefficients and accuracy of the mathematical model are calculated. The results were tested on training and test arrays. The mathematical function has been optimized, as a result of which the points found with the maximum efficiency of the solar collector.

References

- Chirin D.A., Irodov V.F., Chernoivan A.A. Experimentalnyi doslidgenya sonyachnogo kolektora plivkovogo tipu [Experimental research of a film type solar collector]. // Vcheni zapiski Tavriyskogo nacionalnogo universitetu im. Vernadskogo – Kiev, 2019. №5. – P. 194-197.
- Stratan F.I., Irodov V.F. Evolyutsionnye algoritmy poiska optimalnykh resheniy [Evolutionary algorithms for finding optimal solutions]. Kishinev, 1984. – P.16-30.
- Irodov V.F. O postroenii i shodimosti evolyutsionnih algoritmov samoorganizatsii sluchaynogo poiska [About the construction and convergence of evolutionary algorithms of self-organization and random search]. // Avtomatika. – Kiev, 1987. - №4. – P.34-43.
- Irodov V. Self-organization methods for analysis of non-linear systems with binary choice relations // Journal Systems Analysis Modelling

Simulation. Gordon and Breach Science Publishers, Inc. Newark, NJ, USA. Vol. 18-19, 1995. – 203 – 206 pp.

5. Irodov V.F., Chirin D.A., Dudkin K.V., Chornoivan A.A. Pat. Sonyachniy kolektor z teploobminom u plivci ridini: pat.133072 Ukrayina (UA): MPK F24S 10/00 [Solar collector with heat transfer in a liquid film: pat. 133072 Ukraine (UA): IPC F24S 10/00]. 2018.

6. Emmerich M., Deutz A. Multicriteria Optimization and Decision Making [Virtual Resource] LIACS Master Course. -2006. – 84 p. – Access Mode : URL:

<http://natcomp.liacs.nl/MOB/material/mco4.pdf>. -Title from Screen. – Date of Access : 28 September 2015.

7. Ivanov S.Y., Ray A.K. Multiobjective optimization of industrial petroleum processing units using Genetic algorithms. XV International Scientific Conference “Chemistry and Chemical Engineering in XXI century” dedicated to Professor L.P. Kulyov / University of Western Ontario, Department of Chemical and Biochemical Engineering – Canada, 2014. – 7-14 p.

8. Zitzler E. Thiele L. An evolutionary algorithm for multiobjective optimization the strength Pareto approach. – Zurich : TIK – Report, 1998. – 43p.

9. Bukatova I.L. Evoltsionnoe modelirovanie i ego prilogeniya [Evolutionary modeling and its applications] – M.: Science, 1979. – 232 p.

10. Ivahnenko A.G., Zaychenko U.P., Dimitrov V.D. Prinyatie resheniy na osnove samoorganizatsii [Self-decision making] – M.: Sov. radio, 1976. – 280 p.

11. Ivahnenko A.G. Systemi evristicheskoy samoorganizatsii v tehnichestkoy kibernetike [Heuristic self-organization systems in technical cybernetics] – K.: Technics, 1971. – 392 p.

12. Kureychik V.M. Geneticheskie algoritmi i ih primeneniye [Genetic algorithms and their application] – Taganrog: TRTU, 2002, - 242 p.

13. Rudkovskaya D., Pilinskiy M., Rudkovskiy L., Neyronie seti, geneticheskie algoritmi i nechetkie mnogistva [Neural networks, genetic algorithms and fuzzy systems] – M.: Hotline – Telecom, 2013. – 384 p.

Sadigov I.R.

Department of Mechanics,
Azerbaijan University of Architecture and Construction,
Ayna Sultanova 11, Baku, Azerbaijan

THE STABILITY OF THIN-WALLED OPEN- PROFILE BARS WITHIN THE NONLINEAR ELASTIC DEFORMATION

Abstract. The paper considers researches dealing with the stability of thin-walled open-profile bars. The widespread use of thin-walled bars in engineering constructions is resulted in a significant reduction in the weight of these systems. Considering the relevance of the given problem, the stability of nonlinear deformation to the central axis direction of the thin-walled bars has been investigated. The physical nonlinearity of the bar’s material, dependence of the normal tension in its cross-section on the relative linear deformation has been taken as the form of the dual cubic polynomial. An appropriate nonlinear differential complex equation for a single torsion angle has been composed for the determination of the normal and touching tensions at bar’s cuts in the non-free torsion of the longitudinal compression of the bar subjected to nonlinear deformations, and free touch tensions in free torsion towards the direction of the thickness of the bar. In order to use the small parameter method for the solution of this differential equation, the small parameter expression is composed of the elastic characteristics of the bar material. The solution line of the form of the nonlinear differential equation due to the small number of parameters is divided into differential equations, so that their solution is easily carried out. As a result, the expression of thin-walled bar’s tension is obtained in the third approximation.

Keywords: Thin-walled bar, nonlinear deformation, open -profile, deplanation, non-free torsion, bending, curling moment, sectorial field, sustainability.

INTRODUCTION

The tap of the thin-walled bars in different constructions, especially in shipbuilding, aviation industry, and construction of high-mile buildings, etc., caused a creation of the new computation theory. The famous scientist, Vlasov’s fundamental works had an irreplaceable role in the sphere of the creation and development of this theory [1]. Taking into account that the thin-walled bars squeezed in the longitudinal direction are problematic ones, the significant investigations of Peres N., Goncalves R., Camotim D. and others along with Vlasov’s survey had a great impact on their work on calculations for sustainability [2-4, 9].

Unlike the closed contoured or the whole cut thin-walled bars, the open-profile bars are slightly resistant to torsion. According to the general theory of open

profile thin-walled bars, in the torsion of such bars their cuts are bent, thus various points take different movements in the direction of the central longitudinal axis of the bar. Such longitudinal displacements are called deplanation.

PROBLEM STATEMENT

If the deplanation of the cuts of the bar doesn’t occur freely, it implies that normal tensions arise in non-free torsion. In this case touch tensions also arise in the points of the cut of the bar. These touching tensions are indicated as τ^{q-s} , they are accepted like regularly disseminated in wall thickness of the shaft [1]. In the free torsion the tensile stresses varying by linear law in the direction of bar thickness are called free touching tensions, and are indicated as τ^s (see Fig. 1).

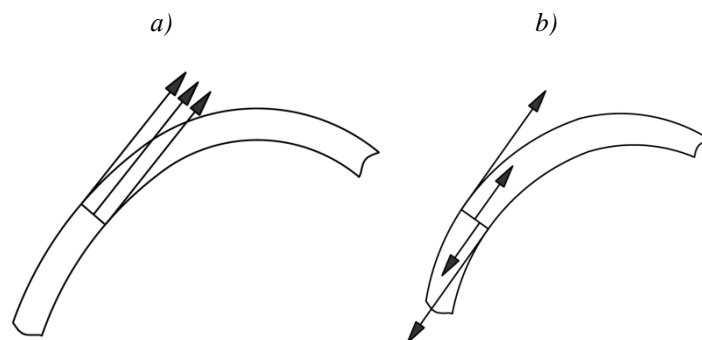


Figure 1. The touching tensions.
Non-free torsion; b) Free torsion

When we indicate the momentum that is born of internal touch forces in the free torsion with \overline{M}_b , and the momentum that is born of touch forces in the non-free torsion with $\overline{\overline{M}}_b$, the full torque momentum is taken as follows:

$$M_b = \overline{M}_b + \overline{\overline{M}}_b \quad (1)$$

The shift (deplanation) u of any point of the cut of the bar to the longitudinal axis x can be taken as follows [2]:

$$u = -\alpha(x) \cdot \omega(s), \quad (2)$$

here $\alpha(x)$ – is the relative torsional angle of bar, which is the function of x variable, $\omega(s)$ – is the sectorial area of S function. Sectorial area as rotation of radius-vector that takes its beginning from any polar point k is assumed as double area resulting from the movement of the last (the second) point on the middle line of the bar wall (Fig. 2).

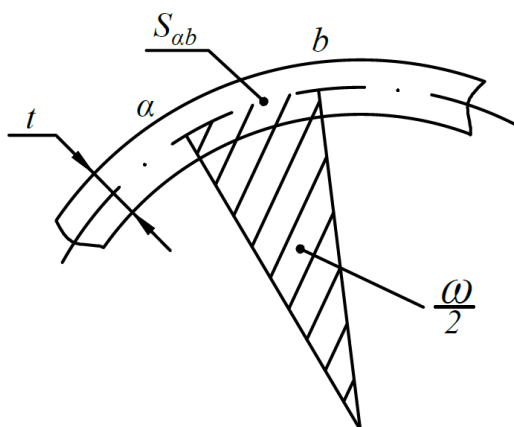


Figure 2. The sectorial area.

The negative symbol in Eq. (2) indicates the counterclockwise rotation of the radius-vector. Considering that the bar material is non-linear elastic, we find normal tension in its most extreme non-free torsion in the cut of the bar as follows [5]:

$$\sigma_x = E_o \varepsilon_x - E_1 \varepsilon_x^3, \quad (3)$$

here E_o, E_1 – are elastic constants of the bar material, ε_x is the relative longitudinal linear deformation.

Choosing the Method of Solution

Let's make the last expression as follows:

$$\sigma_x = E_o \varepsilon_x (1 - \nu \beta \varepsilon_x^2), \quad (4)$$

here $\nu = \frac{E_1}{E_o} \varepsilon_{m.h.}^2$ – is the small parameter drawn from the elasticity of the bar material ($\nu < 1$), $\beta = 1/\varepsilon_{m.h.}^2$, $\varepsilon_{m.h.}$ – is the relative

deformity of the material due to the range of the tolerance of the material [6].

Using Koshi dependences and considering Eq. (2), we can write the following:

$$\varepsilon_x = -\frac{d\alpha(x)}{dx} \cdot \omega(s), \quad (5)$$

here the single torsion angle $\alpha(x)$ equals to derivative of θ – through x variable:

$$\alpha = -\frac{d\theta}{dx}$$

Taking into account the last equation, we can substitute Eq. (5) with Eq. (4) and have:

$$\sigma_x = -E_o \left[\frac{d^2\theta}{dx^2} \omega(s) - \nu \beta \left(\frac{d^2\theta}{dx^2} \right)^3 \cdot (\omega(s))^3 \right] \quad (6)$$

Considering the following equilibrium Eq. (6) we determine the touching tensions:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau}{\partial s} = \mathbf{0}, \text{ from here}$$

$$\tau = -\int_0^s \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} ds = E_o \left[\frac{d^3 \theta}{dx^3} \int_0^s \omega ds - \nu \beta \cdot \frac{d}{dx} \left(\frac{d^2 \theta}{dx^2} \right)^3 \int_0^s (\omega(s))^3 ds \right] \quad (7)$$

We take the last equation and multiply it with the thickness of the bar wall t and get the intensity of the flood of the forces touching along its wall:

$$\tau t = -\int_0^s \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} t ds = E_o \left[\frac{d^3 \theta}{dx^3} \int_0^s \omega t ds - \nu \beta \cdot \frac{d}{dx} \left(\frac{d^2 \theta}{dx^2} \right)^3 \int_0^s (\omega(s))^3 t ds \right] \quad (8)$$

In Eq. (8) we mark $t ds = dF$ and $\tau \cdot t = q$, but integrals are indicated as follows:

$$- S_\omega = \int_0^s \omega dF - \text{sectorial static momentum (unit of measurement sm}^4\text{),}$$

$$- J_\omega = \int_0^s \omega^2 dF - \text{sectorial inertial momentum (unit of measurement sm}^6\text{).}$$

Considering these signs, we make Eq. (8) in the following form [7]:

$$q = E_o \left[\frac{d^3 \theta}{dx^3} S_\omega - \nu \beta \cdot \frac{d}{dx} \left(\frac{d^2 \theta}{dx^2} \right)^3 \cdot \int_F \omega^3 dF \right] \quad (9)$$

We define the $\overline{\overline{M}}_b$ momentum due to arrow passing through the k pole of the tensile forces in the non-free torsion. As it is seen from Fig. 3, sm^6 is polar momentum of elemental force $q \rho ds = q \cdot d\omega$ (here $d\omega = \rho ds$ – is the growth of the sectorial area).

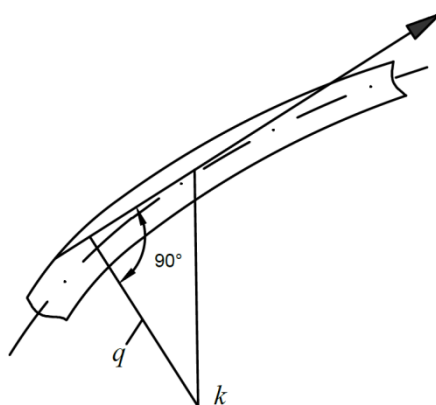


Figure 3. Determination of momentum of the touched force.

Momentum alternative $\overline{\overline{M}}_b$ is written as follows:

$$\overline{\overline{M}}_b = \int_F q d\omega = E_o \left[\frac{d^3 \theta}{dx^3} \int_F d\omega \int_F \omega dF - \nu \beta \cdot \frac{d}{dx} \left(\frac{d^2 \theta}{dx^2} \right)^3 \cdot \int_F d\omega \int_0^s \omega^3 dF \right],$$

here integration is carried out on all F areas.

We get this equation through partial integration:

$$\overline{\overline{M}}_b = E_o \left[\frac{d^3\theta}{dx^3} \left(\omega \int_F \omega dF - J_\omega \right) - \nu\beta \cdot \frac{d}{dx} \left(\frac{d^2\theta}{dx^2} \right)^3 \cdot \left(\omega \int_F \omega^3 dF - \int_F \omega^4 dF \right) \right] \quad (10)$$

In the definition of the sectorial area the starting position of the radius-vector is determined by the fact that the exact sectorial static momentum of the field is zero, that is:

$$S_{\omega,F} = \int_F \omega dF = 0 \quad (11)$$

Realization of the Method

Taking into consideration the above-mentioned symbols, we put Eq. (10) in this form:

$$\overline{\overline{M}}_b = -E_o \left[J_\omega \cdot \frac{d^3\theta}{dx^3} - \nu\beta \cdot \frac{d}{dx} \left(\frac{d^2\theta}{dx^2} \right)^3 \cdot \left(\omega \int_F \omega^3 dF - \int_F \omega^4 dF \right) \right] \quad (12)$$

We can write the momentum of the tensile forces of the profile that are created by the free torsion as follows:

$$\overline{M}_b = GJ_k \cdot \frac{d\theta}{dx} \quad (13)$$

here GJ_k is rigidity of profile in torsion, J_k is inertia momentum of torsion. We can write the equation in the following way (if profile consists of rectangle):

$$J_k = \frac{1}{3} \eta \sum_{i=1}^n s_i \cdot t_i^3, \quad (14)$$

here S_i is the length of the i small wall, t_i is the thickness, and η – is the ratio that is the basis of the shape of the cut. The unit of J_k measurement is sm^4 .

According to Eq. (1) the general torsional momentum equals to the sum of Eq. (12) and Eq. (13):

$$M_b = -E_o \left[J_\omega \cdot \frac{d^3\theta}{dx^3} - \nu\beta \cdot \frac{d}{dx} \left(\frac{d^2\theta}{dx^2} \right)^3 \cdot \left(\omega \int_F \omega^3 dF - \int_F \omega^4 dF \right) \right] + GJ_k \frac{d\theta}{dx} \quad (15)$$

This equation (Eq. 15) is the nonlinear differential equation of the non-free torsion of the open profile thin-walled bar.

Let's express touching forces with the following new $B(x)$ function of the momentum of the torsional forces in non-free torsion:

$$\frac{dB}{dx} = \overline{\overline{M}}_b \quad (16)$$

here B is called bending – torsional bimoment (bumper), or simply bimoment, its unit of measurement is $kN \cdot sm^2$.

In the process of comparing Eq. (6) and Eq. (12) we get:

$$\overline{\overline{M}}_b = \frac{d\sigma_x}{dx} \cdot \frac{J_\omega}{\omega} \quad (17)$$

While comparing Eq. (16) and Eq. (17) we get:

$$\sigma_x = \frac{B \cdot \omega}{J_\omega} \quad (18)$$

We can see from here that, the normal tensions in the non-free torsion are proportional to the bimoment, and while it is $\sigma_x = 0$, $B = 0$ is obtained.

Placing Eq. (16) in Eq. (12) we integrate according to x and get the following:

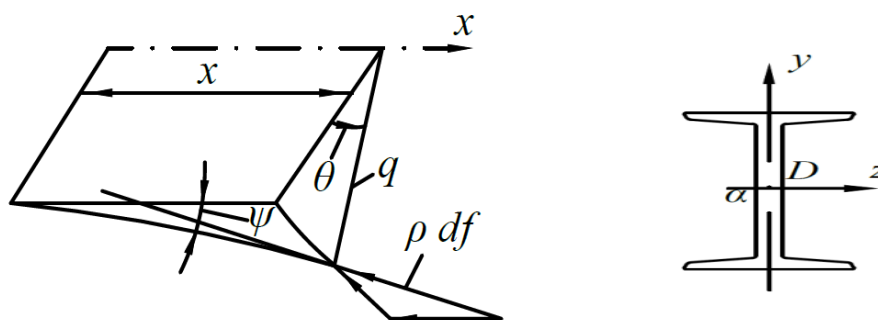
$$B = -E_o \left[J_\omega \cdot \frac{d^2\theta}{dx^2} - \nu\beta \left(\frac{d^2\theta}{dx^2} \right)^3 \cdot \left(\omega \int_F \omega^3 dF - \int_F \omega^4 dF \right) \right] \quad (19)$$

We differentiate both sides of Eq. (15) according to x and get:

$$E_o \left[J_\omega \cdot \frac{d^4\theta}{dx^4} - \nu\beta \cdot \frac{d^2}{dx^2} \left(\frac{d^2\theta}{dx^2} \right)^3 \cdot \left(\omega \int_F \omega^3 dF - \int_F \omega^4 dF \right) \right] - GJ_k \frac{d^2\theta}{dx^2} = \frac{dM_b}{dx} = m_b, \quad (20)$$

Here m_b is the intensity of the external bending forces and we accept it as a positive quantity, because M_b decreases while the value of x increases.

First of all, let's look at the existence form of the two symmetry arrows of the bar cut (double-headed form) (Fig. 4, a). Such bar with length of l is influenced by the squeezing P force in the direction of the centre axis x [7].



D-the centre of bending

Figure 4. a) Double-headed cut; b) About computing the torque of the squeezing force.

Let's assume that all the longitudinal fibers except the central fibers are bending from the given force (to the direction of x arrow), i.e. the form of the loss of the tolerance in the torsion of the bar. When looking through the free edge of the bar at the x arrow we accept that the positive direction of the θ rotation angle of any cut of the bar is turning counterclockwise [8].

Before deformation, accepting the fact that dF elemental pitch fits to any fiber in the cut of the bar parallel to x axis, after the torsion the bending radius of

the very fiber will have the curve shape on the surface of the ρ circular cylinder (Fig. 4, b). Let's mark the vertical fiber and angle of the touch to this curve with ψ . The $\sigma \cdot dF$ elemental force that effects the fiber is spinning like ψ angle, creating the momentum around the x arrow, will also be expressed as $\sigma\psi\rho dF$, and the intensity of the full torque momentum will be expressed as follows:

$$m_b = - \int_F \sigma \frac{d\psi}{dx} \rho dF, \quad (21)$$

or considering that $\rho d\theta = \psi dx$ it will be like:

$$m_b = -\sigma \frac{d^2\theta}{dx^2} \int_F \rho^2 dF = -\sigma \frac{d^2\theta}{dx^2} J_p, \quad (22)$$

here J_p is the polar inertia momentum due to the centre of the cut. Writing Eq. (22) for Eq. (20), we get the following nonlinear differential equation [10,11]:

$$E_o \left[J_\omega \cdot \frac{d^4 \theta}{dx^4} - \nu \beta \cdot \frac{d^2}{dx^2} \left(\frac{d^2 \theta}{dx^2} \right)^3 \cdot \left(\omega \int_F \omega^3 dF - \int_F \omega^4 dF \right) \right] + (\sigma J_p - G J_k) \frac{d^2 \theta}{dx^2} = 0, \quad (23)$$

We solve this complex differential equation by using the small parameters method. For this purpose we put Eq. (23) in the following form:

$$\frac{d^4 \theta}{dx^4} - \nu \frac{\beta}{J_\omega} \cdot \frac{d^2}{dx^2} \left(\frac{d^2 \theta}{dx^2} \right)^3 \left(\omega \int_F \omega^3 dF - \int_F \omega^4 dF \right) + \frac{\sigma \cdot J_p - G J_k}{E_o J_\omega} \cdot \frac{d^2 \theta}{dx^2} = 0 \quad (23')$$

We take the solution of the last equation in the following order for a small parameter:

$$\theta = \theta_o + \nu \theta_1 + \dots = \sum_{n=0}^{\infty} \nu^n \theta_n \quad (n \geq 0) \quad (a)$$

We write (a) in the same equation and obtain the following linear differential equation system (the first two equations of the system were shown):

$$\frac{d^4 \theta_o}{dx^4} + \frac{\sigma_{b(o)} \cdot J_p - G J_k}{E_o J_\omega} \cdot \frac{d^2 \theta_o}{dx^2} = 0 \quad (24)$$

$$\frac{d^4 \theta_1}{dx^4} + \frac{\sigma_{b(o)} \cdot J_p - G J_k}{E_o J_\omega} \cdot \frac{d^2 \theta_1}{dx^2} = \frac{\beta}{J_\omega} \cdot \frac{d^2}{dx^2} \left(\frac{d^2 \theta_o}{dx^2} \right)^3 \left(\omega \int_F \omega^3 dF - \int_F \omega^4 dF \right) \quad (25)$$

The following substitution was accepted in Eq. (24):

$$\frac{\sigma_{b(o)} \cdot J_p - G J_k}{E_o J_\omega} = k_o^2, \quad (26)$$

We obtain its solution through the following way:

$$\frac{d^2 \theta_o}{dx^2} = C_1 \sin k_o x + C_2 \cos k_o x \quad (27)$$

Since the boundary conditions are

$$C_2 = 0, C_2 \neq 0$$

we get $\sin k_o l = 0; k_o l = n\pi$ or $k_o = \frac{n\pi}{l}$

Accepting $n=1$, we write $k_o = \pi/l$ in Eq. (26) and find the initial cost of the crisis tension:

$$\sigma_{b(o)} = \frac{\pi^2 E_o J_\omega}{l^2 J_p} + \frac{G J_k}{J_p}, \quad (28)$$

Similarly to the strongest fasteners of the sharpest ends of the bars, we can write Eq. (28) in the following way:

$$\sigma_{b(o)} = \frac{\pi^2 E J_\omega}{(\mu l)^2 J_p} + \frac{G J_k}{J_p}, \quad (28')$$

Here the length coefficient of the bar may be equal to $\mu = 0,5$. If one of the cutting edges of the bar is tightly fastened and the other one is rolling $\mu = 0,7$ is accepted.

Taking into account $C_2 = 0$, Eq. (27) takes the following form:

$$\frac{d^2\theta_o}{dx^2} = C_1 \sin k_o x \tag{29}$$

Considering Eq. (29), the following complex differential in Eq. (25) is defined as:

$$\frac{d^2}{dx^2} \left(\frac{d^2\theta_o}{dx^2} \right)^3 = C_1^3 \left(-\frac{3}{4} k_o^2 \sin k_o x + \frac{9}{4} k_o^2 \sin 3k_o x \right) \tag{30}$$

Subsequently, placing Eq. (30) in Eq. (25) we get:

$$\frac{d^4\theta_1}{dx^4} + k_1^2 \cdot \frac{d^2\theta_1}{dx^2} = \frac{\beta}{J_\omega} C_1^3 \cdot \left(-\frac{3}{4} k_o^2 \sin k_o x + \frac{9}{4} k_o^2 \sin 3k_o x \right)^3 \left(\omega \int_F \omega^3 dF - \int_F \omega^4 dF \right) \tag{31}$$

here

$$k_1^2 = \frac{\sigma_{b(1)} \cdot J_p - GJ_k}{E_o J_\omega} \tag{32}$$

we accept the solution of the differential in Eq. (31) in the following way:

$$\frac{d^2\theta_1}{dx^2} = D_1 \sin k_1 x + D_2 \cos k_1 x + C_1^3 k_o^2 (a \sin k_o x + b \sin 3k_o x) \cdot \frac{\beta}{J_\omega} \left(\omega \int_F \omega^3 dF - \int_F \omega^4 dF \right) \tag{33}$$

by substituting Eq. (33) in Eq. (25), we get equations a and b :

$$a = -\frac{3}{4} \cdot \frac{1}{\alpha_k^2 - 1}, \quad b = \frac{9}{4} \cdot \frac{1}{\alpha_k^2 - 1}, \tag{34}$$

here

$$\alpha_k = \frac{k_1}{k_o}$$

Let's assume that the cutting edges of the bar do not rotate in the flat shape. In this case, the boundary conditions of the equation will be as follows:

$$\left. \begin{aligned} x = 0, \quad x = l \quad \text{olduqda} \quad \theta = 0; \\ x = 0, \quad x = l \quad \text{olduqda} \quad \frac{d\theta}{dx} = 0 \end{aligned} \right\} \tag{35}$$

We write Eq. (29) and Eq. (33) equations to their places in expression a and get :

$$\frac{d^2\theta}{dx^2} = \frac{d^2\theta_o}{dx^2} + v \frac{d^2\theta_1}{dx^2} = C_1 \sin k_o x + v \left[D_1 \sin k_1 x + C_1^3 k_o^2 (a \sin k_o x + b \sin 3k_o x) \frac{\beta}{J_\omega} \left(\omega \int_F \omega^3 dF - \int_F \omega^4 dF \right) \right] \tag{36}$$

We get the last equation by integrating it:

$$\begin{aligned} \frac{d\theta}{dx} &= \frac{d\theta_o}{dx} + v \frac{d\theta_1}{dx} = -\frac{C_1}{k_o} \cos k_o x - \\ &- v \left[\frac{1}{k_1} D_1 \cos k_1 x + C_1^3 k_o^2 \left(\frac{a}{k_o} \cos k_o x + \frac{b}{3k_o} \cos 3k_o x \right) \frac{\beta}{J_\omega} \left(\omega \int_F \omega^3 dF - \int_F \omega^4 dF \right) \right]; \\ \theta &= \theta_o + v \theta_1 = -\frac{C_1}{k_o} \sin k_o x - v \left[\frac{1}{k_1^2} D_1 \sin k_1 x + C_1^3 \left(a \cdot \sin k_o x + \frac{b}{9} \sin 3k_o x \right) \cdot \right. \\ &\quad \left. \cdot \frac{\beta}{J_\omega} \left(\omega \int_F \omega^3 dF - \int_F \omega^4 dF \right) \right] \end{aligned} \quad (37)$$

Substituting Eq. (37) in the boundary conditions of Eq. (35), we get:

$$\begin{aligned} \frac{d\theta}{dx} \Big|_{x=0} &= 0; \quad -\frac{C_1}{k_o} - v \left[\frac{D_1}{k_1} + C_1^3 k_o \left(a + \frac{b}{3} \right) \cdot \frac{\beta}{J_\omega} \left(\omega \int_F \omega^3 dF - \int_F \omega^4 dF \right) \right] = 0; \\ \frac{d\theta}{dx} \Big|_{x=l} &= 0; \quad \frac{C_1}{k_o} \cos k_o l + v \left[\frac{D_1}{k_1} \cos k_1 l + C_1^3 k_o \left(a \cos k_o l + \frac{b}{3} \cos 3k_o l \right) \cdot \right. \\ &\quad \left. \cdot \frac{\beta}{J_\omega} \left(\omega \int_F \omega^3 dF - \int_F \omega^4 dF \right) \right] = 0; \\ \theta \Big|_{x=0} &= 0; \\ \theta \Big|_{x=l} &= 0; \quad -\frac{C_1}{k_o^2} \sin k_o l - v \left[\frac{D_1}{k_1^2} \sin k_1 l + C_1^3 \left(a \sin k_o l + \frac{b}{9} \sin 3k_o l \right) \cdot \right. \\ &\quad \left. \cdot \frac{\beta}{J_\omega} \left(\omega \int_F \omega^3 dF - \int_F \omega^4 dF \right) \right] = 0 \end{aligned} \quad (38)$$

From the first of the conditions of Eq. (38) we get:

$$C_1^3 = -\frac{\frac{C_1}{k_o} + v \frac{D_1}{k_1}}{v k_o \frac{\beta}{J_\omega} \left(a + \frac{b}{3} \right) \cdot \left(\omega \int_F \omega^3 dF - \int_F \omega^4 dF \right)} \quad (39)$$

Having written the last expression in the place of other conditions of Eq. (38), we obtain the following algebraic equations for C_l and D_l constants:

$$\begin{aligned} \frac{C_1}{k_o} \left(\cos k_o l - \frac{a \cdot \cos k_o l + \frac{b}{3} \cos 3k_o l}{a + \frac{b}{3}} \right) + v \frac{D_1}{k_1} \left(\cos k_1 l - \frac{a \cdot \cos k_o l + \frac{b}{3} \cos 3k_o l}{a + \frac{b}{3}} \right) &= 0 \\ \frac{C_1}{k_o^2} \left(\sin k_o l - \frac{a \cdot \sin k_o l + \frac{b}{9} \sin 3k_o l}{a + \frac{b}{3}} \right) + v \frac{D_1}{k_1^2} \left(\sin k_1 l - \frac{a \cdot \sin k_o l + \frac{b}{9} \cos 3k_o l}{a + \frac{b}{3}} \right) &= 0 \end{aligned} \quad (40)$$

Making the Eq. (40) system's determinant equal to zero for getting the smallest value of the k_l , we obtain the following complex algebraic equations system:

$$\begin{aligned} \frac{1}{k_1^2 k_o} \left(\cos k_o l - \frac{a \cos k_o l + \frac{b}{3} \cos 3k_o l}{a + \frac{b}{3}} \right) \left(\sin k_1 l - \frac{a \sin k_o l + \frac{b}{9} \sin 3k_o l}{a + \frac{b}{3}} \right) + \\ + \frac{1}{k_o^2 k_1} \left(\sin k_o l - \frac{a \sin k_o l + \frac{b}{9} \sin 3k_o l}{a + \frac{b}{3}} \right) \left(\cos k_1 l - \frac{a \cos k_o l + \frac{b}{3} \cos 3k_o l}{a + \frac{b}{3}} \right) &= 0 \end{aligned}$$

Defining the minimum equation for the coefficient k_l through numerical methods from the last equation and writing it in Eq. (32) we determine the crisis tension - $\sigma_{b(1)}$ in the first approach:

$$\sigma_{b(1)} = \frac{k_1^2 E_o J_\omega + G J_k}{J_p} \quad (41)$$

Analogically, as described above, by keeping the first two boundaries of the expression (\mathbf{a}) and having written in the differential Eq. (23') we get appropriate $k_2 = 2\pi/l$ coefficient, and the crisis tension $\sigma_{b(2)}$ according to the $n = 2$ condition of the small parameter, i.e. due to $v^2 - a$. Thus, we determine the crisis tension in the second approximation of thin-walled bar:

$$\sigma_b^{(II)} = \sigma_{b(0)} + v \sigma_{b(1)} + v^2 \sigma_{b(2)} \quad (42)$$

Numerous calculations have shown that, the difference between the sum of the first two limits of Eq. (42) and ($\sigma_b^{(I)}$ – the first approximation) the second approximation is 1,64%. Therefore we can be satisfied with that the equation can be solved by the solution in the second approach.

CONCLUSION

The problem of clamping resistance in the centre of the thin-walled open profile bars has been extensively studied. For the first time, the nonlinear elastic property of the material of the bars is taken into account, in addition, the nonlinear differential equilibrium equation for the determination of crisis tension has been compiled. The smallest parameters method, which is most optimal for determining the crisis tension in the differential equation, has been used. As a result, the complex nonlinear differential equation

is divided into several simple linear differential equations and their solution provides the satisfactory results specially in the second approximation.

References

- [1] Vlasov V. Thin-walled elastic beams. 2nd ed. Springfield, Va.: National Technical Information Service; 1984.
- [2] Peres N, Goncalves R, Camotim D. First-order generalized beam theory for curved thin-walled members with circular axis. Thin-Walled Structures 2016; vol.107: 345-361. DOI: 10.1016/j.tws.2016.06.016
- [3] Fouzi MSM, Jelani KM, Nazri NA, Sani MSM. Finite Element Modelling and Updating of Welded Thin-Walled Beam. International Journal of Automotive and Mechanical Engineering 2018; 15(4): 5874-5889. DOI: 10.1007/s40430-018-1475-z

[4] Bebiano R, Eisenberger M, Camotim D, Goncalves R. GBT-Based Buckling Analysis Using the Exact Element Method. *International Journal of Structural Stability and Dynamics* 2017; 17(10): 17501255. DOI: 10.1142/s0219455417501255

[5] Ronaldo I, Borja. *Plasticity*. Springer, Berlin; 2013.

[6] Rousselier G, Quilici S. Combining porous plasticity with Coulomb and Portevin-Le Chatelier models for ductile fracture analyses. *International Journal of Plasticity* 2015; vol.69: 118-133. DOI: 10.1016/j.ijplas.2015.02.008

[7] Walter L. *Nonlinear Structural Mechanics: Theory, Dynamical Phenomena and Modeling*. Springer US; 2013.

[8] Leipholtz U. *Theory of elasticity*, Springer Netherlands; 2014.

[9] Pastor MM, Bonada J, Roure F, Casafont M. Residual stresses and initial imperfections in non-linear analysis. *Engineering Structures* 2013; vol.46:493-507. DOI: 10.1016/j.engstruct.2012.08.013

[10] Sadigov IR. Physical nonlinear elastic deformations of smooth ring. *Transactions of NAS of Azerbaijan* 2016; vol. 36:74–80.

[11] Zhang RJ, Wang C, Zhang Q. Response analysis of the composite random vibration of a high-speed elevator considering the nonlinearity of guide shoe. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* 2018; vol.40: 4.

УДК 626.627.8

*Абилов Рашид Саффан оглы,
докторант, научной сотрудник,
Азербайджанский Научно-Исследовательский и
Проектно-Изыскательный Институт Энергетики,
лаборатория «Источники альтернативной энергии и
малые электрические станции»
г. Баку, Азербайджан*

РАЗРАБОТКА И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ОТСТОЙНИКА ДЛЯ ГИДРОЭНЕРГЕТИКИ И ИРРИГАЦИИ

*Abilov Rashad Saffan oglu,
Doctoral student, researcher,
Azerbaijan Scientific-Research and Design Institute of Surveying Energy,
laboratory of «alternative energy sources and small power stations»
Baku, Azerbaijan*

DEVELOPMENT AND IMPROVEMENT OF THE SEDIMENT DESIGN FOR HYDRO-POWER ENGINEERING AND IRRIGATION

Аннотация. В статье рассматриваются и анализируются различные типы отстойников (по конструктивным схемам, по режиму потока), изучена динамика осаждения и способом промывки наносов. Даны рекомендации по использованию в гидроэнергетике и ирригации разных конструкций отстойников.

Abstract. Different types of sedimentation basins are considered and analyzed in the article on constructive schemes, the flow regime, the dynamics of sedimentation and the method of washing of sediments, and the recommended improvement for hydropower and irrigation of various sedimentation tanks have been studied.

Ключевые слова: потоки, осаждения, наносы, элементы, конструкции, ирригация, частицы.

Key words: flows, sediments, deposits, elements, structures, irrigation, particles.

Очистка воды методом отстаивания применяется на гидросооружениях, в системах централизованного водоснабжения и канализации.

Отстойники представляют собой резервуары или открытые емкости, в которых методом отстаивания удаляются из воды механические примеси. В ходе этого процесса частицы дисперсионной фазы в зависимости от плотности вещества либо всплывают на поверхность воды, либо оседают на дно резервуара. Частицы, осевшие на дно, образуют осадок. В ряде случаев осаждение сопровождается укрупнением частиц. Отстаивание воды является довольно распространенным способом удаления грубодисперсных механических примесей. Этот метод применяется в системах гидроузлов, централизованного водоснабжения и канализации, на ГЭС,

ирригационных сооружениях, а также при очистке коммунальных сточных вод и после биологической очистки стоков [2, 3].

На насосных станциях и ГЭС поступающие воды из открытых источников подвергаются отстаиванию для того, чтобы предотвратить истирание лопастей гидротурбин и частей насосов твердыми примесями размером более 0,25 мм. Применение отстойников в ирригационных системах целесообразно, чтобы не допустить засорения илом оросительных каналов.

В системах централизованного водоснабжения отстойники применяются на водоочистных станциях, для предварительного осветления воды с

мутностью более 2 г/л. Отстаиванию подвергаются только те частицы примеси, размеры которых превышают 10...5 см. Частицы размером от 10...7 до 10...5 см, образуя коллоидную микрогетерогенную систему, и при отстаивании не оседают из-за уравнивания сил тяжести и энергии броуновского движения для частиц с малыми массами.

Традиционно для удаления из воды коллоидных примесей применяют коагулянты, а образовавшиеся в результате этого хлопья удаляют в отстойниках или ином оборудовании. Чтобы отстаивание было полным, скорость течения воды максимально понижают до 0,25...0,5 м/сек. Вторым фактором, влияющим на полноту осаждения, является длительность отстаивания, которая обычно составляет 1,5...2,0 ч.

Классификация отстойников осуществляется по различным признакам, по мнению автора наиболее правильной является классификация в зависимости от направления основного потока очищаемой воды. По этому признаку отстойники подразделяются на горизонтальные, вертикальные и радиальные.

Наиболее распространенными являются горизонтальные отстойники, которые применяются на водоочистных станциях с производительностью 15...50 тыс. м³ в сутки. Как правило, в них удаляется до 60 % взвешенных примесей. Горизонтальный отстойник представляет собой прямоугольный железобетонный резервуар, состоящий из нескольких отделений. Его длина может достигать 48 м, а ширина обычно бывает в 3...5 раз меньше. Глубина этого сооружения не должна превышать 4 м. Толщина водного слоя, как правило, составляет 2,0...2,5 м. Вода в горизонтальный отстойник поступает через ряд отверстий в торцевой стенке, затем распределяется по всему резервуару и протекает по всей длине отстойника. Вывод очищенной воды осуществляется через водослив у противоположной стороны сооружения.

Для сбора осадка на дне отстойника располагается несколько приемков. Осадок, не попавший в приемок, счищается со дна специальным скребковым устройством. Перемещение скребков вдоль отстойника осуществляется с помощью зубчатой и цепной передачи. При движении по дну скребки собирают осадок, а при перемещении по поверхности воды — всплывшие на ее поверхность примеси, направляя их к специальному желобу. Удаление осадков из приемков может осуществляться путем слива по трубам на дне, подъема по иловым трубам под напором воды и с помощью плунжерного насоса. Недостатками горизонтальных отстойников являются:

- высокая стоимость монтажа;
- низкая надежность скребкового механизма;
- наличие застойных зон, где осадок не удаляется.

Другим распространенным видом являются вертикальные отстойники, которые представляют собой цилиндрические резервуары с коническими днищами. Чаще всего они применяются для первичного отстаивания воды на водоочистных станциях или удаления взвеси после коагулирования.

В вертикальные отстойники вода поступает по трубе сверху в нижнюю часть агрегата и распределяется по всей плоскости поперечного сечения. Осадок собирается в нижней конической части, а очищенная вода восходящим потоком поднимается вверх и переливается через круговой водослив в сборный лоток. Перед сливом располагается специальная перегородка, удаляющая всплывшие примеси.

Осадок в процессе отстаивания собирается в нижней части аппарата и удаляется через специальный бункер. Скребковые механизмы устанавливаются только в отстойниках со значительными количествами осадка. Обычно в вертикальных отстойниках удается удалить до 40 % взвешенных примесей.

Вертикальные отстойники по конструкции и условиям эксплуатации являются более простыми, чем горизонтальные. Их важным достоинством является значительная величина кольцевого водослива в верхней части. Это позволяет сильно понизить скорость течения, в результате чего уменьшается вероятность выноса осадков. К недостаткам этого вида аппаратов относится сложность удаления осадка из разгрузочного люка при отсутствии скребкового механизма.

Одной из разновидностей вертикальных аппаратов являются радиальные отстойники. Высота их гораздо меньше 0,1...0,15 м, а диаметр обычно имеет большой размер 16...60 м, а в некоторых случаях может достигать 100 м. Радиальные отстойники применяются для осветления очень мутных вод и очистки воды в системах промышленного водопроводного водоснабжения. Вода подается в такие устройства по трубам в центральную часть, а слив производится через круговой водослив в верхней части аппарата. Осевший на дно осадок собирают вращающимися скребками. Радиальные отстойники применяются на очистных сооружениях с производительностью более 20 тыс. м³ в сутки и обеспечивают удаление 50 % взвешенных веществ.

Режим работы отстойника. Здесь рассматривается отстойник с периодической промывкой только одного тина, названный ранее энергетическим, но он в равной степени применим и в условиях ирригации. Отстойник используется для осаждения сравнительно крупных фракций взвешенных наносов 0,20...0,25 мм и крупнее. Такие фракции наносов в открытых грунтовых каналах без одежды, как правило, не перемещаются, поэтому отстойник располагают в гидроузле или в незначительном удалении от него.

Отстойник с периодической промывкой работает в два такта. В первом, по времени более продолжительном, происходит осаждение части взвешенных наносов из потока воды, поступающего из реки, и одновременно подача осветленной воды потребителю. Во втором такте отложившиеся наносы из отстойника удаляются, подача воды в канал из промываемой камеры прекращается [2, 3].

Отстойники с прямым и обратным уклонами. Продольный уклон камер отстойников необходим для создания повышенных скоростей потока при гидравлическом смыве наносов. Для осаждения их, то есть при работе отстойника в первом такте, уклон существенной роли не играет. Уклон камер может быть прямым (положительным) и обратным (отрицательным) по отношению к движению воды при осаждении взвешенных наносов.

Отстойники с прямым уклоном применяют чаще, конструкция их проще.

Отстойники с обратным уклоном сложнее, но они предпочтительнее в случае преобладания среди наносов частиц крупных фракций. Объем отложившихся наносов в камере с обратным уклоном будет больше, чем в камерах с прямым уклоном. Это вытекает из того, что в начале камеры происходит более интенсивное осаждение наносов; глубина камер здесь также будет больше [2, 3].

Существует довольно много разнообразных типов отстойников с непрерывной промывкой, описанных в специальной литературе. Вместе с тем в учебниках под отстойниками с непрерывной промывкой понимается только один из них, названный здесь энергетическим. Название это условно и принято только для того, чтобы как-то выделить этот тип из других ему подобных.

Проведенных многочисленных экспериментальных и научных исследований разработано две новой конструкции отстойника.

Криволинейный отстойник, в составе прямой угольной латок с уклоном в сторону выпуклой стеной с затвором внутри выпуклой стеной имеется

промывное трубы с прямой угольной сечению и собиратель в прямой угольном сечении открытой форме, отличается тем, промывное трубы выполнено круглой сечению с затвором внизу выпуклой стеной, а собиратель круглой сечению внутри выпуклой стеной.

Принцип действия отстойника основан на искусственном создании благоприятных для борьбы с наносами в циркуляционных течением транспортируются ко входному отверстию промывное трубы круглой сечению внизу выпуклой стеной. Установлено также, что в криволинейный отстойником кроме донных наносов перехватывается также до 20% взвешенных наносов крупных фракции $d > 0,25$ мм.

Отстойник в составе прямоугольный железобетонный камера, для пуска промывного расхода воды сифонного устройства, затвор, промывное галерея отличается тем, для транспортирование песчано-гравийном и ильном отложение в нижний бьеф, труба собиратель в круглой поперечное сечению выполнено внутри водосливное стеной, патрубки удерживающий песчано-гравийном и ильном отложение в конце прямоугольный железобетонный камера на дне водосливное стеной перпендикулярно соединено с трубой собирателя, а для периодический промывки отстойника на боковое стеной камера установлено затвор.

Преимущество разработанного отстойника от прежних состоит в том, что входящий в отстойник песчано-гравийными и ильными отложениями интенсивно направляется на патрубки, которые расположено на уровне дна отстойника внизу водосливное стеной, смешиваясь с водой входят в трубой собирателя расположена в внутри водосливное стеной. Благодаря винтовые движения потока в трубе с большими скоростями песчано-гравийными и ильными отложениями легко транспортируются в нижний бьеф. Для периодический промывки отстойника на боковое стеной камера установлено затвор.

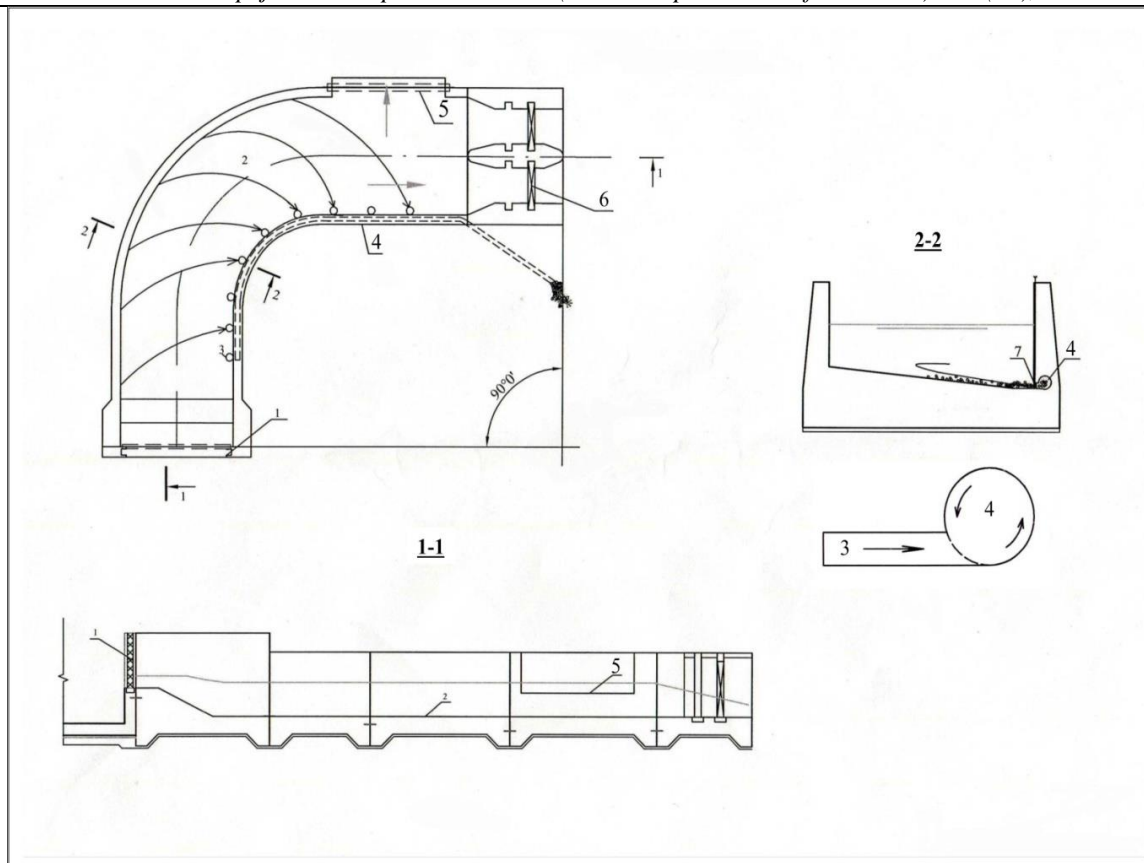


Рис. 1. Криволинейный отстойник: планы и разрезы.

Решетка стальная-1; прямоугольный лоток-2; трубы промывное-3; собиратель-4; водозаборной затвор-5; промывные затворы в конце ка-6; затвор для регулирования-7.

В такой компоновке отстойник выполняет роль преграды для песчано-гравийными и ильными

отложениями, уменьшая их поступление трубы гидроэлектростанции.

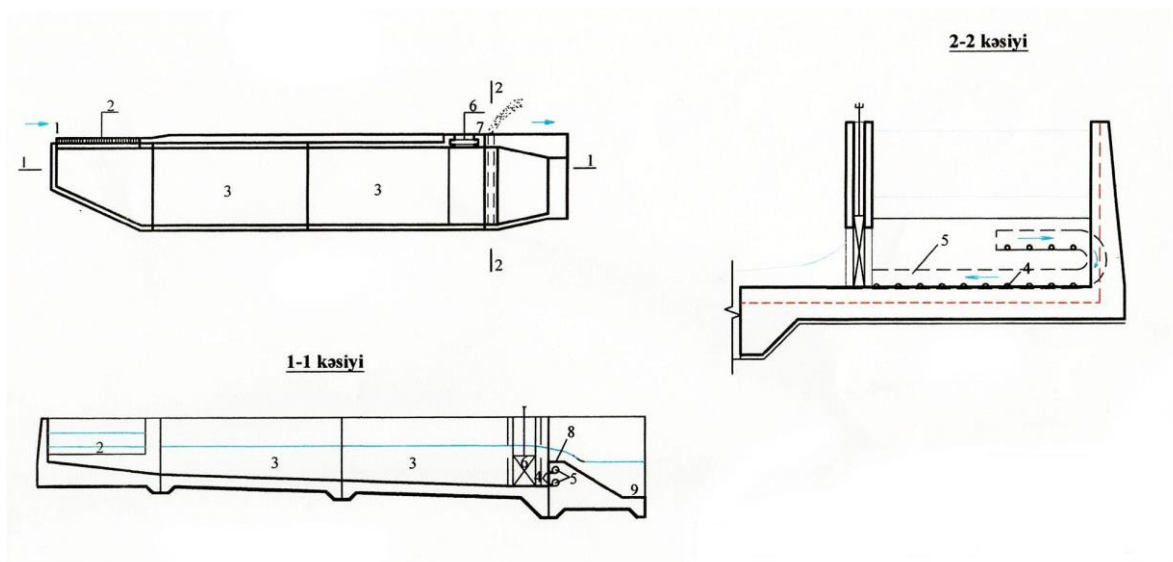


Рис. 2. Отстойник: планы и разрезы.

Верхний бьеф-1; водозабор-2; камера-3; трубки гравиеловки-4; собиратель-5; затвор-6; нижний бьеф-7; водосливные стенки-8; деривационный канал-9.

Рассматриваемый тип отстойников применяют для осаждения сравнительно крупных фракций взвешенных наносов 0,20...0,25 мм. и крупнее. Условия его применения такие же, как и рассматриваемого ранее отстойника с

периодической промывкой. Выполняют его однокамерным и многокамерным и размещают как в составе водозаборного гидроузла, так и в некотором удалении от гидроузла [2, 3].

Режим работы отстойников. Особенность работ отстойников с непрерывной промывкой состоит в том, что одновременно с осаждением и удалением взвешенных наносов происходит подача осветленной воды потребителю. Глубина воды в таких отстойниках постоянная, но режим потока неравномерный вследствие изменения расхода по длине камеры при отборе части его на промывку.

Особенность этих отстойников заключается также в том, что они не имеют мертвого объема для осаждения наносов и длина камер у них меньше длины камер отстойников с периодической промывкой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

Р.С.Абилов «Разработка облегченной конструкции горного водозабора и результаты его экспериментальных исследований /Водные ресурсы и водопользование. г. Астана.: 7(90) 2011, с. 39-41.

Г.И.Журавлев «Гидротехнические сооружения», М.: 1979, с. 345-348.

Н.М.Иванов «Отстойники в очистных системах». Режим доступа: <http://gkhprofi.ru/actual-subjects/vodosnabzhenie-i-ochistka-vody/otstojniki-v-ochistnyh-sistemah-m-ivan/> Дата обращения 01.07.2017г.

*Аманжулова Жанна **

Казахская академия транспорта и коммуникаций имени М.Тынышпаева, Казахстан, г. Алматы, ул. Шевченко, 97.

Wójcik Waldemar

Люблинский политехнический университет, Польша, г. Люблин, Ul. M.Brzeskiej 11/11

Избаирова Алия

Казахская академия транспорта и коммуникаций имени М.Тынышпаева, Казахстан, г. Алматы, ул. Шевченко, 97.

ПРОБЛЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ДВИЖЕНИЯ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ МАНЕВРОВЫХ РАБОТ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

Аннотация. В статье описываются проблемы обеспечения безопасности движения при выполнении маневровых работ в целом и на станции Алматы 1 в частности. На основании анализа существующих проблем обеспечения безопасности движения, предлагается внедрение системы маневровой автоматической локомотивной сигнализации на станции Алматы 1. Основная цель заключается в выявлении преимуществ, которые приносит в процесс маневровой работы на станции данная система. В статье рассмотрена структура технических средств системы, описаны функциональные составляющие. Внедрение системы МАЛС обеспечит безопасность движения, сократит риски вреда станционных перегонов; сократит риски влияния человеческого фактора на управление маневровым локомотивом, благодаря спутниковым технологиям управления появится возможность автоматизированного планирования работ, уменьшится время простоя транзитных поездов с переработкой, увеличится перерабатывающая способность станции.

Ключевые слова: безопасность, локомотив, железнодорожная станция, маневровая работа, маневровая автоматическая локомотивная сигнализация.

Введение

Работа железных дорог в современных рыночных условиях требует поиска и внедрения новых эффективных технологий организации перевозок и методов их реализации, направленных на улучшение экономических показателей отрасли и совершенствования качества перевозок. Необходимо обеспечить регулярность, пунктуальность и ритмичность эксплуатационной работы на железнодорожных направлениях, дифференцированный подход к организации перевозок.

Среди многочисленных факторов, характеризующих деятельность железнодорожного транспорта, безопасность движения играет первостепенную, главенствующую роль. Безопасность движения поездов – центральный

системообразующий фактор, объединяющий различные составляющие железнодорожного транспорта в единую систему [1].

Безопасность движения поездов — состояние защищенности перевозочного процесса от аварийных ситуаций в работе, обеспечивающее сохранность грузов, безопасность пассажиров и персонала, сохранение окружающей природной среды и бесперебойное функционирование железных дорог. Безопасность движения обеспечивается надежной работой, исправным состоянием и резервированием основных технических средств железнодорожного транспорта: сооружений и устройств железных дорог, подвижного состава, а также правильной организацией движения поездов (рис. 1).



Рисунок 1. Составляющие безопасности движения поездов

Нарушения безопасности движения в поездной и маневровой работе на железных дорогах классифицируются: крушения поездов, аварии, особые случаи брака в работе, случаи брака в работе.

Материалы и методы

За 12 месяцев 2018 года по Алматинскому отделению грузовых перевозок при АО «КТЖ» было допущено 52 случая нарушения безопасности движения против 40 случаев за аналогичный период 2017 года, увеличено на 12 случаев или на 23%. Только за декабрь 2018 года по станции Алматы-1 задержано по отправлению 197 грузовых поездов на 1 685,93 ч.

Как показывает анализ аварийных ситуаций, возникающих при выполнении маневровой работы на станции, чаще всего виной всему является пресловутый человеческий фактор. Ошибочное восприятие сигнала с соседнего пути, приведение локомотива в движение без команды, превышение установленной скорости при манёврах, субъективная оценка расстояния до группы стоящих вагонов и нерасчётливое управление тормозами – вот неполный перечень причин, которые приводят к взрзу стрелочных переводов, повреждениям вагонов и локомотивов, утрате грузов и другим негативным последствиям [2].

Решение задач поставленных перед железнодорожным транспортом невозможно без ускорения оборота вагонов, повышения перерабатывающих способностей станций и производительности труда без увеличения численности штатного контингента на транспорте. В значительной мере эти задачи могут быть решены на базе внедрения эффективных технических средств автоматизации транспортных процессов, способствующих совершенствованию

технологии выполнения поездной и маневровой работы. Основной функцией системы Маневровой автоматической локомотивной сигнализации (МАЛС) является обеспечение не проезда маневровыми локомотивами светофоров с запрещающими показаниями на станции. Объектом управления системы являются маневровые локомотивы, оборудованные устройствами МАЛС [3].

В структуру МАЛС входит:

- станционное устройство (СУ) связанное с системой ЭЦ на станции и автоматизированное рабочее место (АРМ) управляемое дистанционно дежурным по станции, горке и прочие;
- бортовая аппаратура сигнализации, установленная на локомотиве;
- радиоканал для передачи данных (РПД);
- комплект спутниковой навигации;
- средства контроля и диагностирования системы Система МАЛС передает на локомотив такие команды, как:
 - самостоятельное-автоматизированное торможение и остановку перед запрещающим сигналом светофора;
 - заблаговременное уменьшение скорости движения вблизи предупреждающих показаний и участками пути, на которых производятся станционные работы;
 - автоматический контроль скорости движения по станции, согласно ПТЭ;
 - возможность экстренной остановки локомотива с бортовой аппаратурой сигнализации, с приказа дежурного по станции;
 - разрешение/запрет выезда локомотива на перегон. Данная система обеспечивает:
 - мониторинг параметров и местоположение локомотива;

- маневровое движение по маршруту, не изолированного от поездного движения;
- контроль работы станционных и локомотивных устройств, радиосвязи;
- автоматизированное формирование статистической справки по показателям работы локомотивов (без ручного ввода).

Дежурные по станции посредством АРМ МАЛС контролируют скорость движения и перемещения маневрового локомотива, производится мониторинг экстренных остановок и команд, подаваемых машинистом с использованием бортовой аппаратуры МАЛС [4].

Система МАЛС кроме вышеперечисленного обладает возможностью:

- сбор статических данных, о работе маневрового локомотива с БА МАЛС;
- предусмотрен анализ технологических ситуаций, рассматриваемых в масштабе реального времени совместной работы устройств ЭЦ, РПД, БА МАЛС, машинистов, а также дежурных по станции;
- просмотр в реальном времени электронной скоростемерной ленты.

Данная система позволяет значительно разгрузить работников организации движения поездов. Возрастает автоматизация процесса, а также безопасность движения поездов маневрового порядка. [2]

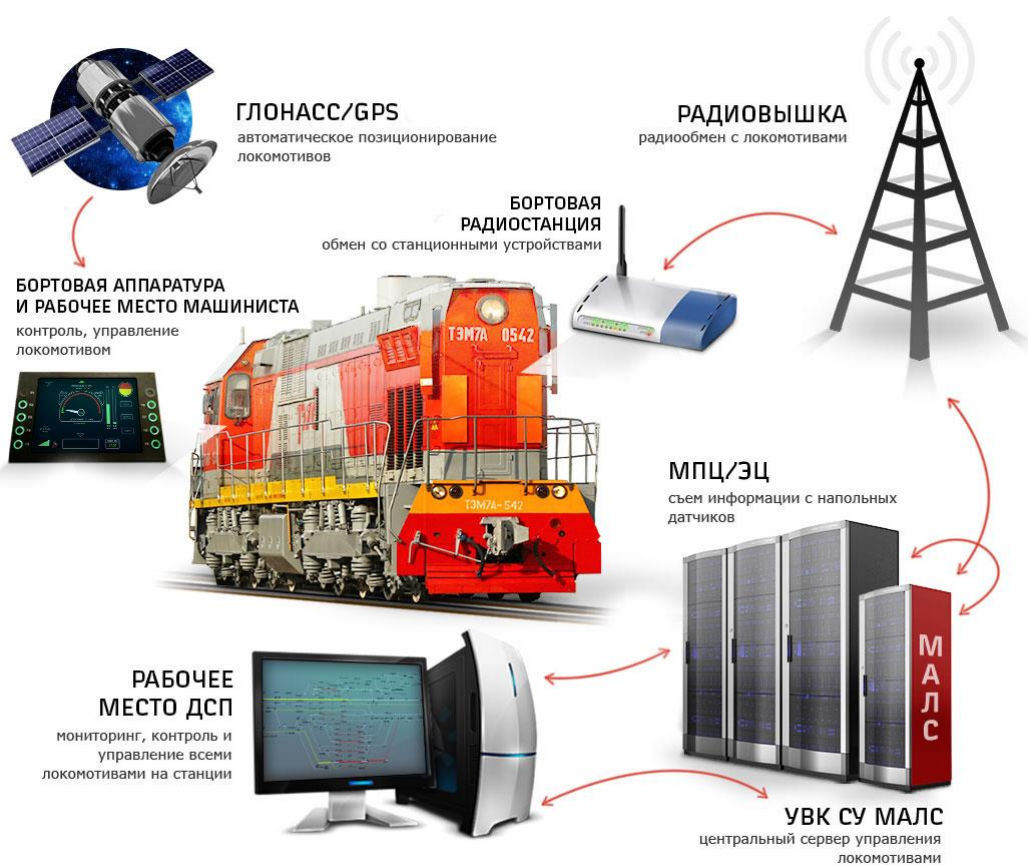


Рисунок 2. Структура технических средств МАЛС

Система МАЛС предназначена для передачи на локомотивные устройства команд, обеспечивающих набор и снижение скорости, экстренное торможение, в том числе обеспечивается выдача команд на:

- автоматическую остановку маневрового локомотива (состава) перед светофором с запрещающим показанием, при скатывании локомотива или при таких типичных ошибках машинистов, как: неправильное восприятие или неправильная интерпретация машинистом команд составителя или дежурного по станции;
- снижение скорости при приближении к светофору с запрещающим показанием или месту проведения работ на станционных путях;

- запрет движения маневрового локомотива по станции со скоростью выше разрешенной ПТЭ, приказом начальника дороги, введенными предупреждениями;
- экстренную остановку маневрового локомотива, оборудованного БА, по приказу дежурного по станции;
- выдачу разрешения или запрета на выезд маневрового локомотива на перегон.

Система обеспечивает:

- 1) контроль местоположения и параметров движения маневрового локомотива;
- 2) проведение маневров по маршрутам, не изолированным от поездного движения, в зоне ЭЦ при движении локомотивом вперед;

3) регистрацию и протоколирование работы локомотивных, станционных устройств и средств радиосвязи.

4) автоматизированное формирование статистической справки по показателям работы локомотивов (без ручного ввода).

Дежурные по станции, диспетчерский и командный персонал через АРМ МАЛС могут контролировать перемещение и скоростные режимы движения маневровых локомотивов, причины экстренной остановки локомотивов, команды задаваемые машинистом с использованием БА МАЛС в пределах зоны контроля системы МАЛС [6].

Литературный обзор

С первых лет появления и развития железных дорог учёные и практики-железнодорожники уделяли значительное внимание совершенствованию маневровой работы на станциях. К середине XX века учеными были выработаны теоретические основы рациональной организации процесса составообразования, которые в дальнейшем легли в основу работ по исследованию вопросов организации маневровых работ на станциях сети железных дорог. Работы многих ученых посвящены разработке автоматизированных систем управления станционными процессами. Статья [4] является логическим продолжением научных исследований, в которых предложено, что для удовлетворения заданных ограничений в задачах маневрового планирования должны быть определены не только заказы работ, но и сроки их выполнения. В статье [5] была описана теория зависимости между вероятностью своевременного выполнения операций и психофизиологического состоянии дежурного по станции. Авторы статьи [6] S.A. Branishtov, D.A. Tumchenok и другие предлагают автоматизированную систему поддержки принятия решений по управлению поездами и маневровой работой, в реальном масштабе времени контролировать вставки в расписания и соответствие; перепланировка поездной и маневровой работы на предстоящие мероприятия с целью минимизации задержки поезда в пути. В статье [7] разработана оптимизационная формулировка и процедура решения для определения емкости железнодорожных станций в отношении оптимального числа маневровых и классификационных операций на узлах железнодорожной сети. Авторы статьи [8] В.В. Журавель и И.Л. Журавель выполнив имитационное моделирование работы станции, на основании его установили основные причины задержек и сложностей в работе. Предложено с целью улучшения показателей функционирования станции усовершенствовать конструкцию путевого развития, что позволит уменьшить продолжительность маневровых передвижений и соответствующие эксплуатационные расходы. В статье [9] в качестве критерия эффективности порядка разбиения поездов использовались

эксплуатационные расходы сортировочной станции, в том числе затраты, связанные с нахождением вагонов и локомотивов на станции и ее подходах, а также затраты, связанные с дополнительными маневровыми работами. С помощью имитационного моделирования получена зависимость, описывающая влияние погрешности прогнозирования прибытия поездов и объемов обрабатываемых вагонов на снижение эксплуатационных затрат сортировочных станций за счет управления порядком расформирования поездов. В исследовании [10] планирование маневровых поездов рассматривается как хороший пример вида планирования, который не поддерживается основным планированием инструментов. Описывается объектно-ориентированный фреймворк и сопутствующая библиотека компонентов проектирования и разработка передовых систем планирования. Предлагается использование библиотеки в целях быстрой разработки прототипа для планирования поддержки шунтирования планирования, включая алгоритмы, ориентированные на задачи и расширенное интерактивное управление.

Результаты

Система МАЛС состоит из:

- а) станционных устройств (СУ), увязанных с системами ЭЦ станции и включающих в себя устройства управляющего вычислительного комплекса, контроллер сбора данных (для релейных систем ЭЦ), автоматизированные рабочие места (АРМ) системы (для руководителей станции, дежурных по станции, по горке, маневровых диспетчеров и т.п.);
- б) бортовой аппаратуры (БА МАЛС), устанавливаемой на маневровых локомотивах;
- в) стационарного и мобильных комплектов оборудования радиоканала передачи данных (РПД);
- г) стационарного и мобильных комплектов средств спутниковой навигации (ССН);
- д) средств мониторинга системы (для электромехаников СЦБ и машинистов-инструкторов эксплуатационных локомотивных депо) в том числе удалённого.

Перечень подсистем и их назначение:

1 подсистема - устройство станционное маневровой автоматической локомотивной сигнализации (СУ МАЛС), предназначенное для реализации функций и задач системы МАЛС, связанных с повышением безопасности движения при проведении маневровых работ, повышением безопасности при проведении работ на путях, а также с работой ЭЦ, действиями дежурных по станции, маневровых диспетчеров, электромехаников СЦБ и связи.

2 подсистема - аппаратура бортовая маневровой автоматической локомотивной сигнализации (БА МАЛС), предназначенная для приема и обработки данных, передаваемых с СУ МАЛС по каналу радиосвязи, для измерения скорости и направления движения локомотива, а

также отображения необходимой информации для машиниста на экране монитора.

3) подсистема - оборудование сервисное маневровой автоматической локомотивной сигнализации (СО МАЛС), предназначенное для проверки работоспособности, диагностики и выявления дефектов в СУ МАЛС и БА МАЛС.

Требования к способам и средствам связи для информационного обмена:

1) подсистемы СУ МАЛС и БА МАЛС в условиях эксплуатации должны быть связаны между собой только по цифровому радиоканалу связи;

2) подсистема СО МАЛС должна быть связана с подсистемами СУ МАЛС и БА МАЛС по цифровому радиоканалу, а также должна иметь возможность кабельного соединения при проведении работ по проверке работоспособности составных частей системы.

3) частотный диапазон радиостанции цифрового радиоканала должен быть 150 МГц или 460 МГц, в зависимости от региона поставки системы.

Режимы функционирования системы:

1) ручной - работа системы в режиме отображения информации без информационного обмена по цифровому радиоканалу;

2) автономный - работа системы в режиме информационного обмена по цифровому радиоканалу без задания маршрутов;

3) телеуправление - работа системы с реализацией всех заложенных функций [11, 12].

Состав многоканального аппаратно-программного комплекса системы передачи данных маневровой автоматической локомотивной сигнализации показан на рисунке 3.

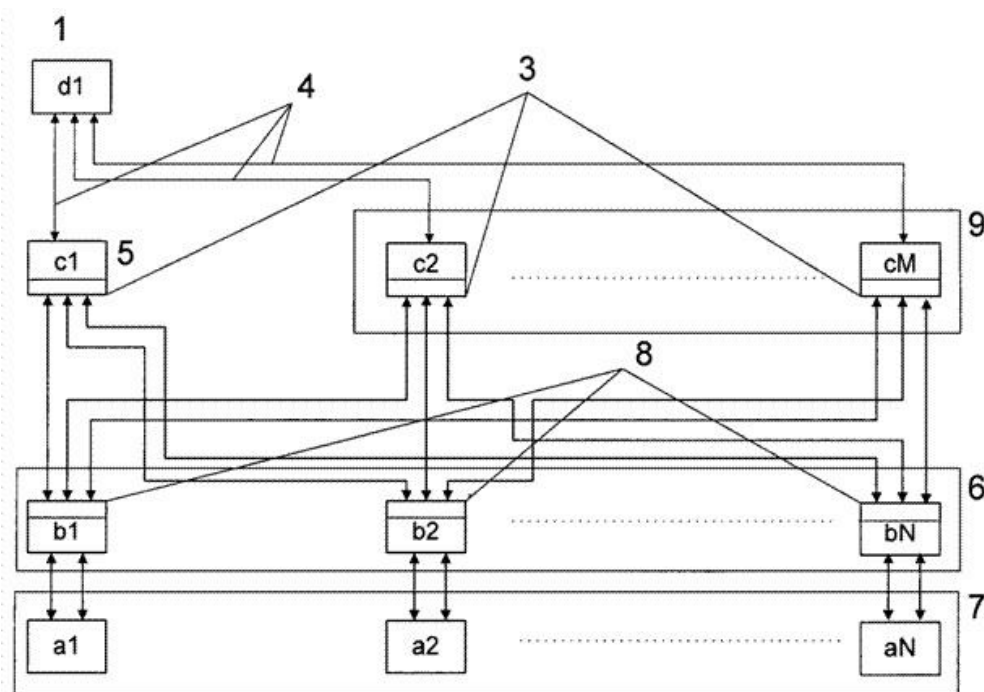


Рисунок 3. Состав многоканального аппаратно-программного комплекса системы передачи данных маневровой автоматической локомотивной сигнализации

Где 1 - размещенное на железнодорожной станции станционное устройство, соединенное по кабельным линиям связи - 4, со станционным комплектом радиооборудования - 5, включающим станционный радиомодем - 3, связанный по радиоканалу с бортовыми комплектами радиооборудования - 6, включающими бортовые радиомодемы - 8, соединенные с бортовой аппаратурой МАЛС - 7. По всей зоне контроля

системы маневровой автоматической локомотивной сигнализации установлены дополнительные станционные комплекты радиооборудования - 9, подключенные по кабельным линиям связи - 4 к станционному устройству - 1 и по радиоканалам к бортовым комплектам радиооборудования - 6.

Схема процедуры регистрации локомотива в частотном канале показана на рисунке 4.

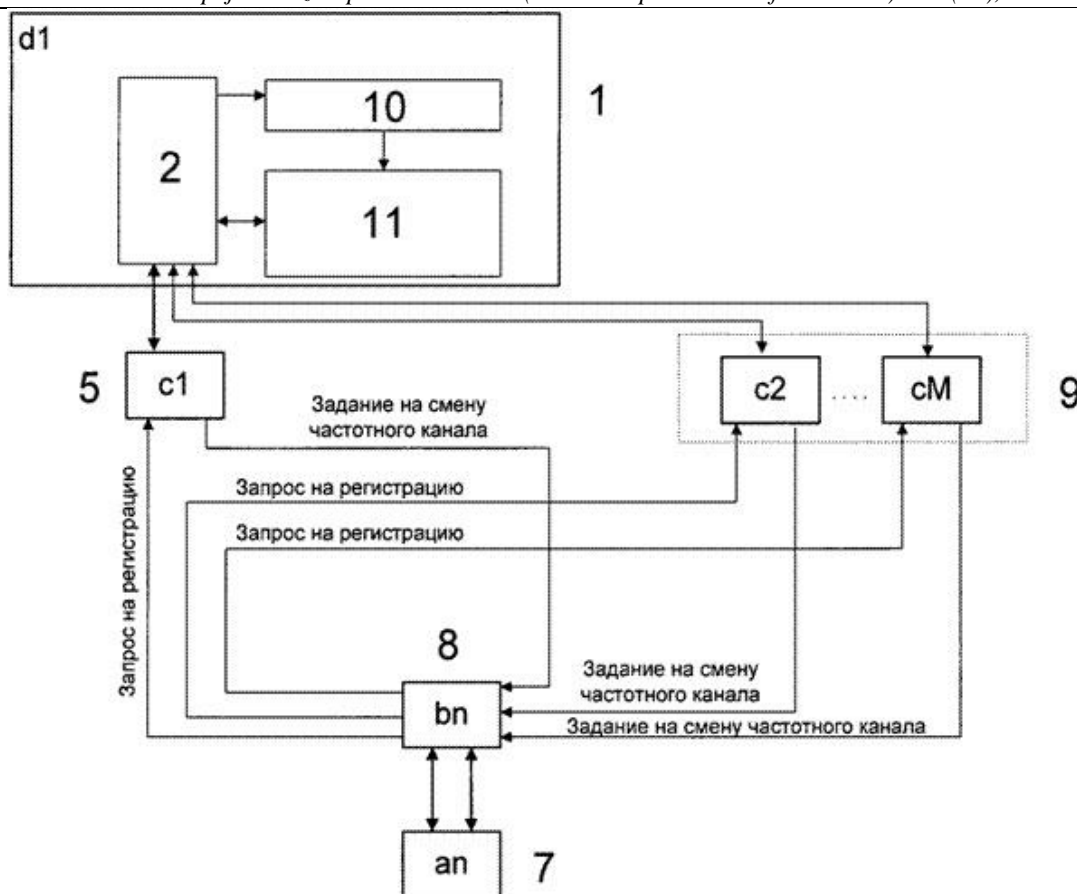


Рисунок 4. Процедура регистрации локомотива в частотном канале

При этом станционное устройство - 1 включает управляющий вычислительный комплекс - 2, а также модуль регистрации размещения локомотивов - 10 и модуль счетчика распределения локомотивов по частотным каналам - 11. Выход модуля счетчика распределения локомотивов по частотным каналам соединен с управляющим вычислительным комплексом - 2, который

соединен с входом модуля регистрации размещения локомотивов, к выходу которого подключен модуль счетчика распределения локомотивов по частотным каналам [13].

Блок-схема алгоритма выбора частотного канала аппаратно-программного комплекса системы передачи данных МАЛС показана на рисунке 5.

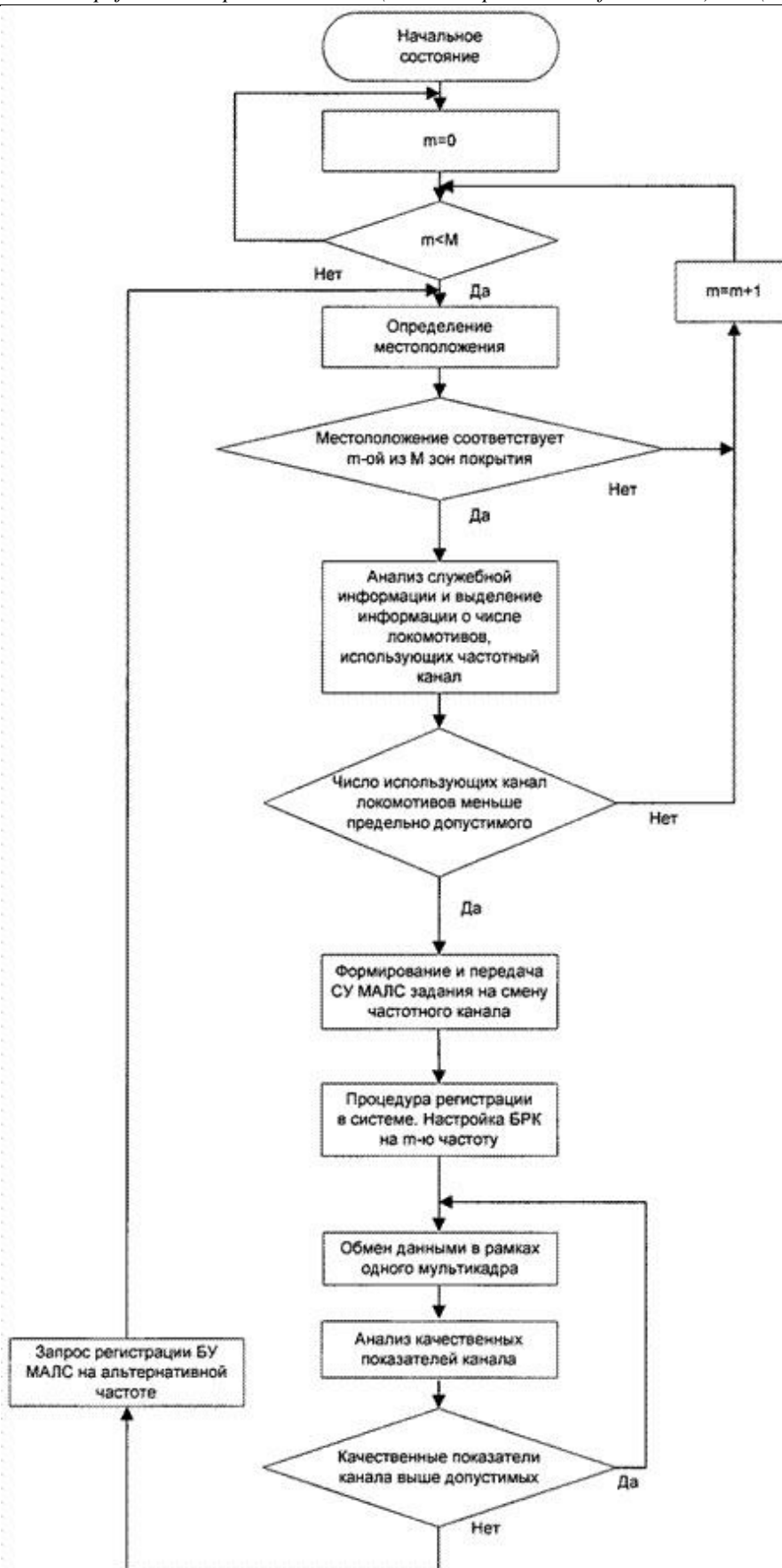


Рисунок 5. Блок-схема алгоритма выбора частотного канала аппаратно-программного комплекса системы передачи данных МАЛС

Алгоритм выбора частотного канала (АВЧК) выполняется вычислительными средствами СУ МАЛС и БА МАЛС. АВЧК использует следующую априорную информацию:

- геометрические параметры зон радиопокрытия, создаваемые М СКР, существующих на станции;
- набор всех числом М значений рабочих частот СКР, используемых на станции;
- местоположение локомотива на плане зоны контроля и управления;
- максимально допустимое число обслуживаемых в одном частотном канале локомотивов;
- допустимый уровень вероятности битовой ошибки;
- допустимый уровень пакетной ошибки.

Геометрические параметры зон радиопокрытия представляют собой координатно-зависимую функцию, определяющую положение границ зон радиопокрытия на плане зоны контроля и управления системы МАЛС в пределах станции и на подъездных путях.

Набор всех значений рабочих частот представляет собой матрицу соответствия значений рабочих частот и номеров зон радиопокрытия в пределах зоны контроля и управления системы МАЛС [14].

Алгоритм выбора частоты основан на следующих основных критериях:

- позиция локомотива в зоне контроля и управления системы МАЛС;
- наличие свободного ресурса в частотном канале;
- качественные показатели канала.

Критерий выбора частотного канала по позиции локомотива в зоне контроля и управления системы МАЛС основан на использовании приемников сигналов спутниковой навигации, устанавливаемых на локомотиве, и априорной информации о геометрических параметрах зон радиопокрытия от всех СКР.

Критерий наличия свободного ресурса в канале основан на анализе служебной информации АПК СПД МАЛС, передаваемой во временных интервалах типа DL1.

Критерий качественных показателей канала основан на определении и сравнении с допустимыми значениями уровней вероятности битовой и пакетной ошибок в канале. Уровень битовой ошибки определяется посредством диагностических сообщений от БКР 6, передаваемых в информационном потоке ИПЗ. Уровень битовой ошибки определяется посредством использования помехоустойчивого кода, который кроме исправления ошибок обеспечивает и вычисление числа ошибок в пакете. Уровень пакетной ошибки определяется посредством анализа числа утраченных или поврежденных до степени невозможности восстановления пакетов. Для определения числа утраченных пакетов используется анализ служебной информации. Критериями утраты пакета являются следующие события:

- отсутствие ответа на запрос регистрации в системе;
- отсутствие в данных от СУ МАЛС, предназначенных для БА МАЛС, квитанции о приеме предыдущего пакета.

На рисунке 6 представлена структурная схема радиомодемов. Использование такого радиомодема позволяет увеличить скорость передачи информации 19200 бит, обеспечить возможность дистанционного управления радиомодемом. При этом диагностика радиомодема может быть осуществлена как локально, так и удаленно по радиоканалу, а передача данных может быть осуществлена с исправляющим кодированием (помехоустойчивое кодирование).

COM порт RS-232 предназначен для приема и передачи данных по радиоканалу и обеспечивает подачу питания. COM порт RS 485-422 также предназначен для приема и передачи данных. Если прием и передача данных осуществляется через COM порт RS 485-422, то через COM порт RS 232 С подается только питание.

Setup порт RS-232 предназначен для конфигурирования и диагностики радиомодема локально. Ethernet порт обеспечивает доступ для дистанционного управления и передачи диагностических данных [15].

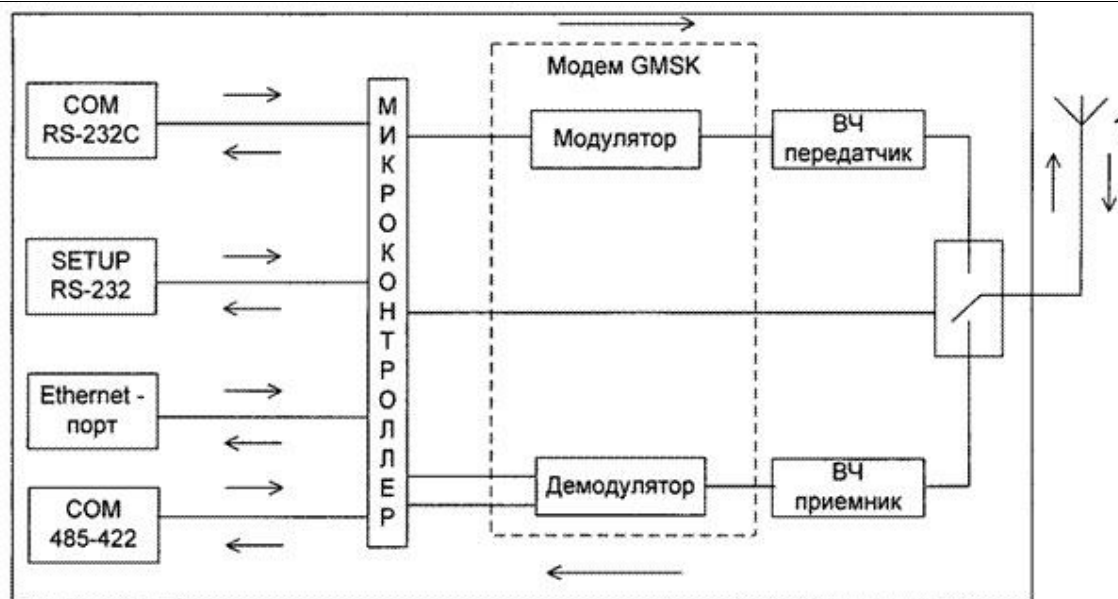


Рисунок 6. Структурная схема радиомодемов

Микроконтроллер (12) обеспечивает:

- помехоустойчивое кодирование;
- добавление контрольной суммы;
- выгрузку дистанционных сообщений;
- осуществляет анализ качества радиоканала;
- выполняет функции синхронизации в сети;
- управляет выходным коммутатором, переключая тракт в режим приема или передачи информации и т.д.

Модулятор осуществляет GMSK модуляцию сформированного на передачу сигнала. ВЧ-передатчик усиливает модулированный сигнал и передает в коммутатор. Коммутатор при этом переключен в режим передачи микроконтроллером. Далее сигнал поступает в антенно-фидерный тракт.

В процессе приема сигнала коммутатор переключается микроконтроллером в режим приема. Принимаемый сигнал поступает на вход ВЧ-приемника, где осуществляется усиление и двойной перенос сигнала на промежуточные частоты. Демодулятор осуществляет выделение импульсного сигнала из входного модулированного GMSK сигнала. Далее сигнал поступает в микроконтроллер, где осуществляется его декодирование и исправление ошибок, сверка контрольной суммы. Полученный информационный сигнал через COM порт RS-232, COM порт RS 485-422 или Ethernet порт передается в СУ 1 МАЛС.

Требуемый объем передачи данных с заданным временем восприятия в СПД МАЛС обеспечивается изменением способа организации обмена между стационарными и бортовыми устройствами СПД МАЛС. СУ 1 МАЛС (d1) и стационарные комплекты радиооборудования СКР (с1...сМ) работают циклически и параллельно, но каждый стационарный СКР передает телеграмму и принимает ответ только тех бортовых комплектов радиооборудования БКР, которые

зарегистрированы в данном радиоканале (на данной частоте), а также принимает заявки от БА МАЛС на регистрацию в данном канале.

Таким образом, происходит процесс перераспределения потоков команд от СКР и потока ответов от БКР между частотными каналами, что позволяет получить следующие преимущества при использовании диапазона 160 МГц:

- сокращение временного цикла обмена между постовыми и бортовыми устройствами МАЛС и СПД МАЛС;
- увеличение пропускной способности для каждого БА МАЛС, что позволяет применять точные методы спутникового позиционирования, передавать в СУ МАЛС диагностическую информацию;
- повышение помехоустойчивости СПД МАЛС за счет возможности перехода на альтернативный частотный канал с меньшей нагрузкой и лучшей помеховой обстановкой;
- расширение числа абонентов сети СПД МАЛС, в том числе для дистанционного управления локомотивами с пультов составителей.

Алгоритм выбора частотного диапазона в СПД МАЛС учитывает три критерия:

- местоположение локомотива определяет первоначальный перечень частотных каналов, на которых данному локомотиву целесообразно регистрироваться;
- загрузка данного частотного канала (не более 6 БКР);
- качество связи в данном частотном канале.

Таким образом, каждый СКР в служебной части телеграммы выделяет короткие временные интервалы (слоты) для адресов, зарегистрированных в канале БКР, и запроса на регистрацию новых БКР. Каждый БКР настраивается на определенный канал, указанный в задании на смену частотного канала в телеграмме

СУ МАЛС, сформированной по результатам позиционирования локомотива. После приема и анализа телеграммы от СУ МАЛС, БА МАЛС посылает в выделенном ему слоте заявку на регистрацию в данном канале. Если в следующем цикле обмена его адрес в служебной части телеграммы СУ МАЛС находится в перечне зарегистрированных БКР, то выполняется процедура приема телеграммы с маршрутным заданием и передачи контрольной информации. В последующем процессе радиообмена БА МАЛС анализирует качественные показатели текущего частотного канала, что обеспечивает своевременный выбор альтернативного частотного канала согласно описанным выше критериям.

Обсуждение

Эффективность системы передачи данных маневровой автоматической сигнализации для крупных железнодорожных станций обеспечивается посредством следующих функций:

- увеличение суммарной пропускной способности системы передачи данных посредством распределения информационных потоков между СУ МАЛС и БА МАЛС в нескольких частотных каналах;

- уменьшение времени выбора альтернативного частотного канала посредством использования информации о местоположении локомотива;

- повышение целостности передаваемых данных посредством внедрения помехоустойчивого кодирования, анализа местоположения локомотива и качественных показателей текущего частотного канала, что обеспечивает своевременный выбор альтернативного частотного канала;

- повышение эффективности использования пропускной способности системы посредством передачи маршрутных заданий только для зарегистрированных в данном частотном канале БА МАЛС [16].

Заключение

Внедрение системы МАЛС и оптимизация выбора очередности маневровых и поездных маршрутов на станции «Алматы 1» обеспечивает:

- безопасность движения;
- сокращение рисков вреда станционных перегонов;

- сокращение рисков влияния человеческого фактора на управление маневровым локомотивом;

- благодаря спутниковым технологиям управления появляется возможность автоматизированного планирования работ.

- уменьшение времени простоя транзитных поездов с переработкой;

- увеличение перерабатывающей способности станции.

Система МАЛС имеет широкие возможности для применения и дальнейшего развития беспилотных технологий управления железнодорожным подвижным составом при осуществлении маневров на станциях при

безусловном выполнении требований безопасности движения.

Список литературы:

1. Зябиров Х.Ш., Шаров В.А. (2004). Оптимизация эксплуатационной работы и обеспечение безопасности перевозок. Железнодорожный транспорт, №1,

2. Журнал «Гудок» Система МАЛС не даст проехать на красный. Выпуск №207 (25646) 20.11.2014 г.

3. «Железнодорожные станции и узлы» учебник/ В. И. Апатцева и Ю. И. Ефименко. – М.: УМЦ ЖДТ, 2014.

4. Tomii, N., Zhou, L. J., & Fukumura, N. (2017). An Algorithm for Shunting Scheduling Problems combining Probabilistic Local Search and PERT. IEEJ Transactions on Electronics, Information and Systems, 119(3), 289–295. https://doi.org/10.1541/ieejieiss1987.119.3_289

5. Zmii, S., Siroklyn, I., Dudin, O., & Nikolajevs, A. (2019). Operations simulating of station duty officer in the case of breakdown in control system. Procedia Computer Science, 149, 44–49. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.01.105>

6. Branishtov, S. A., Tumchenok, D. A., Shirvanyan, A. M., & Vershinin, Y. A. (2016). Automated traffic control system in railways. Proceedings of 2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems, MEACS 2015, 1–5. <https://doi.org/10.1109/MEACS.2015.7414880>

7. Javadian, N., Sayarshad, H. R., & Najafi, S. (2011). Using simulated annealing for determination of the capacity of yard stations in a railway industry. Applied Soft Computing Journal, 11(2), 1899–1907. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2010.06.006>

8. Журавель, В. В., & Журавель, И. Л. (2015). Improvement of the industrial station design for better performance. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2(3(74)), 61. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.40402>

9. BARDAS, O., SKOVRON, I., DEMCHENKO, Y., & DOROSH, A. (2017). Research of Traffic Prediction Accuracy Influence on the Effectiveness of Trains Breaking-Up Order Control. Transport Problems, 12(1), 151–158. <https://doi.org/10.20858/tp.2017.12.14>

10. Fransoo, J. C., Wäfler, T., & Wilson, J. R. (2011). Behavioral operations in planning and scheduling. Behavioral Operations in Planning and Scheduling, 1–471. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-13382-4>

11. Морозов В.Н. Перспективные направления внедрения спутниковых технологий // "Железнодорожный транспорт" - М.-№9.-2009 г.-С. 16-17

12. Поплавский А.А. Автоматизированная система управления перевозочным процессом железнодорожного транспорта в оперативном режиме (сетевой и региональный уровни) // М.: Интекст. - 2008. - 212 с.

13. Зорин В.И. Системы обеспечения безопасности движения подвижного состава нового поколения // Евразия Вести.- М.: 2008.-№7.-8 с

14. О.О. Гренкевич. Разработка методики выбора оптимального способа формирования многогруппных составов по критерию эксплуатационных расходов на маневровую работу. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук //2004. -5-10 с.

15. Министерство транспорта и коммуникаций Республики Казахстан. Инструкции по движению поездов и маневровой работе на железнодорожном транспорте // 2011 г.

16. Системы автоматики и телемеханики на железных дорогах мира // под ред. Г. Теера, С. Власенко.- М.: Интекст, 2010.-496 с.

17. Уманский В.И. Основные принципы

построения автоматизированной системы управления маневровой работой на основе данных о навигационном позиционировании локомотивов // Вестник РГУПС - Научно-технический журнал-Р.-н.-Д.: 2009. - №4-С. 112-121.

18. Каинов В.М. Направление развития современных средств ЖАТ // М.: "Автоматика, связь, информатика".- 2004.-№6-С.2-3.

19. Уманский В.И. Создание автоматизированной системы управления маневровыми и поездными маршрутами на станциях.// // Железнодорожный транспорт-М.: 2011-№ 11 - С.

20. TOMII, N., FUKUMURA, N., & Jian ZHOU, L. (2001). Development of Station Shunting Scheduling Algorithm. Quarterly Report of RTRI, 42(4), 190–194. <https://doi.org/10.2219/rtriqr.42.190>

УДК 621.039.53

*Еремеева Ж.В., Капланский Ю.Ю., Вортыло С, Непанушев А.А., Сидоренко Д.А., Хван А.В.
Национальный исследовательский технологический университет
«МИСиС», Москва*

МЕХАНОХИМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ НАНОПОРОШКА ГАФНАТА ДИСПРОЗИЯ Dy_2HfO_5 ,

Аннотация. Порошки гафната диспрозия Dy_2HfO_5 были получены методом механохимического синтеза из оксидов гафния и диспрозия. Структура и основные физико-химические свойства исследованы с применением методов РФА, растровой электронной спектроскопии, Раман – спектроскопии (КР – спектры), ПЭМ и химического анализов. РФА и анализ КР-спектров показывает, что полное превращение исходных оксидов в однофазный нанокристаллический гафнат диспрозия (Dy_2HfO_5) происходит при механической обработке смеси в течение 40мин.

Ключевые слова: порошки, оксиды гафния и диспрозия, механохимический синтез, нанокристаллический гафнат диспрозия, поглощающие элементы, электронная микроскопия, структура, удельная поверхность, насыпная плотность.

Введение

К поглощающим элементам (ПЭЛам) современных ядерных реакторов предъявляют высокие требования, определяющие рабочий ресурс органов регулирования, такие как: - высокая эффективность поглощения нейтронов, низкая скорость выгорания поглощающих изотопов в процессе эксплуатации в реакторе, высокая стойкость к радиационным повреждениям, стабильность объема как при рабочих температурах эксплуатации, так и при перегревах, коррозионная стойкость [1-3]. В качестве перспективных поглощающих материалов разработчиками рассматриваются гафнат диспрозия, диборид гафния (HfB_2), карбид бора, композиция $B_4C-(10...20)\text{масс.}\% HfB_2$

Основные преимущества гафната диспрозия, как поглощающего материала для органов регулирования легководных реакторов, заключаются в следующем: неограниченная радиационная стойкость, проявляющаяся, прежде всего, в отсутствии распухания; наличие в составе гафната диспрозия двух поглощающих компонентов - Ду и Hf обеспечивает его более высокую физическую эффективность по

сравнению с $Dy_2O_3 \cdot TiO_2$; возможность варьирования физической эффективности изменением состава с сохранением остальных эксплуатационных свойств материала. Согласно расчетам, гафнат диспрозия имеет физическую эффективность на 8-10% большую, чем титанат диспрозия; высокая технологичность при синтезе и изготовлении таблеток из-за отсутствия фазовых переходов и однофазной структуры типа твердого раствора;

В системе $Dy_2O_3-HfO_2$ в широком диапазоне составов (примерно 10-55 мол% Dy_2O_3) существует однофазная область твердых растворов со структурой типа флюорита, для которых отсутствуют фазовые переходы во всем температурном диапазоне вплоть до температуры плавления [4-6].

Наиболее перспективным является применение механохимического метода для получения высокодисперсного порошка гафната диспрозия [7].

Технология получения сплавов в виде порошков методом механохимического синтеза широко используется в настоящее время для изготовления порошков интерметаллидов, твердых растворов, а также аморфных порошков, т.е. для

приготовления материалов сложного химического состава, характеризующихся особыми физико-механическими свойствами, благодаря высокой степени дисперсности структуры, возникшей вследствие деформации. Именно деформация приводит к усложнению состава и образованию наноструктуры объемного характера. Таким образом, продукт механохимического синтеза имеет заданный состав и специфическое структурное состояние. Кроме того, механохимический синтез относится к наименее энергоемким и простым в исполнении способам,

которые можно отнести к быстротекающим твердофазным реакциям [8,9].

Целью данной работы явилось получение нанопорошков гафната диспрозия методом механохимического синтеза и исследование структуры и свойств полученных порошков.

Материалы и методики исследований

В качестве исходных веществ для механохимического синтеза гафната диспрозия использовали оксид диспрозия и диоксид гафния. квалификации ("ч.д.а."), взятых в стехиометрическом соотношении (рисунок 1).

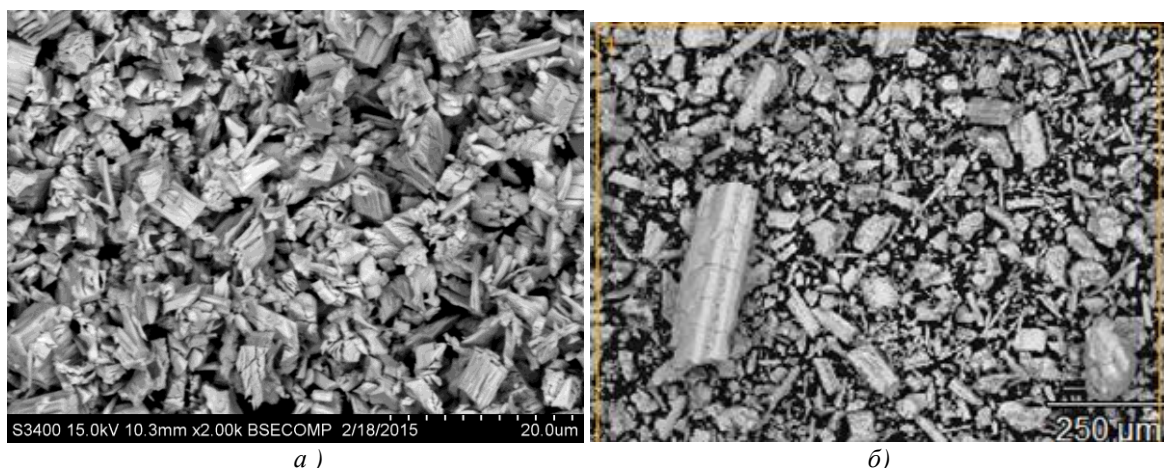


Рисунок 1 - Исходные порошки: а) - оксид диспрозия; б) – диоксид гафния

Механохимический синтез (МХС) осуществляли с использованием шаровой планетарной мельницы «Активатор 2S» при скорости вращения планетарного диска 700 – 1200 об/мин, скорости вращения барабанов - 800 – 2400 об/мин., при отношении массы шаров к массе

шихты -30 - 45 : 1 в атмосфере аргона при P = 3 - 5 атм. в течение 5 - 90 минут. Микроструктура и элементный состав механоактивированной смеси оксидов диспрозия и гафния представлены на рисунке 2 и в таблице 1 (время обработки – 30 мин).

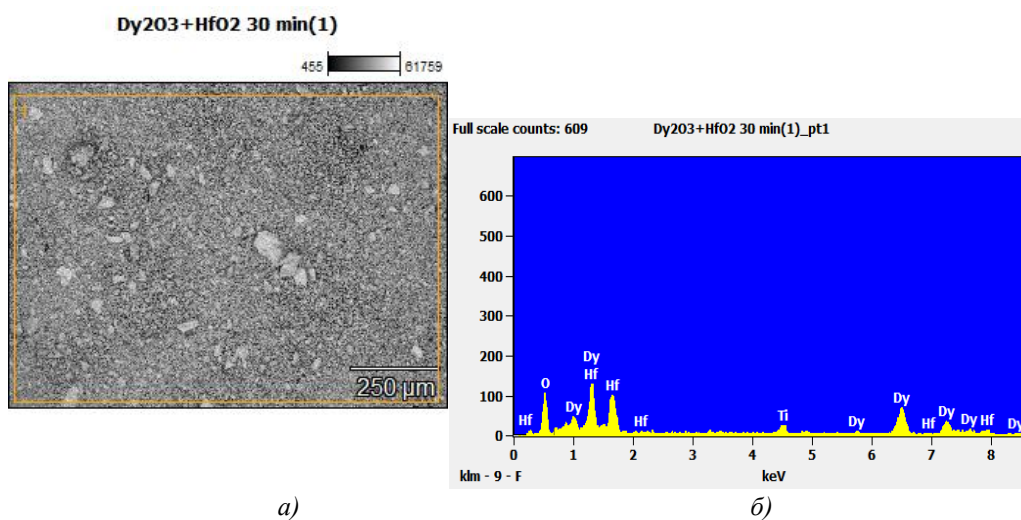


Рисунок 2 – Микроструктура механоактивированной смеси порошков Dy_2O_3 и HfO_2 (а) и элементный состав (б)

Содержание элементов

Weight %	O-K	Ti-K	Dy-L	Hf-L
<i>Dy₂O₃+HfO₂ 30 min(1)_pt1</i>	10.5	3.3	59.7	26.5
Atom %	O-K	Ti-K	Dy-L	Hf-L
<i>Dy₂O₃+HfO₂ 30 min(1)_pt1</i>	52.8	5.5	29.7	12.0

Из представленных данных видно, что элементный состав смеси соответствует заданному содержанию гафния и диспрозия. Наблюдается незначительное количество титана.

Свойства полученного соединения гафната диспрозия изучали методами сканирующей электронной микроскопии, рентгенофазового, Раман-спектроскопией (КР – спектры), ПЭМ и химического анализов.

Удельную поверхность $S_{уд}$ исходных оксидов и полученных порошков диспрозия определяли с помощью анализатора удельной поверхности и пористости NOVA 1200e (США) по методу низкотемпературной адсорбции азота (метод БЭТ). Погрешность измерений удельной поверхности составляет 3 %, диапазон измеряемых площадей от 0,01 до 2000 м²/г. Гранулометрический состав порошка гафната диспрозия, полученного механосинтезом, определяли на универсальном лазерном приборе модели FRITTSCH ANALYSETTE 22 MicroTec plus. Насыпную плотность определяли по стандартной методике в соответствии с ГОСТ 19440-94.

Рентгенофазовый анализ исходных оксидов и полученных соединений проводили на

рентгеновском дифрактометре ДРОН-2.0 в Co излучении с длиной волны излучения (анг.) 1.79021 в диапазоне углов дифракции 2θ от 10° до 130°. Измерение КР-спектров проводили на спектрометре комбинационного рассеяния Horiba Jobin Yvon T64000, с полупроводниковым лазером (λ облучения = 765 нм), объектив Olympus X100.

Электронно-микроскопические изображения и электронограммы, получали с помощью аналитического электронного микроскопа JEM-2100, включающего систему компьютерного управления, в которую интегрировано устройство наблюдения изображения в режиме просвечивающего растрового электронного микроскопа (ПРЭМ) и энергодисперсионного рентгеновского спектрометра (JED-2300).

Химический состав образцов определяли методом эмиссионно-спектрального анализа.

Результаты исследований и их обсуждение

Как показывают результаты РФА, при механохимической обработке (МХО) смеси оксидов диспрозия и гафния на воздухе в течение 5-15 мин наблюдается наличие не прореагировавшего диоксида гафния HfO₂ (рисунок 3, таблица 2).

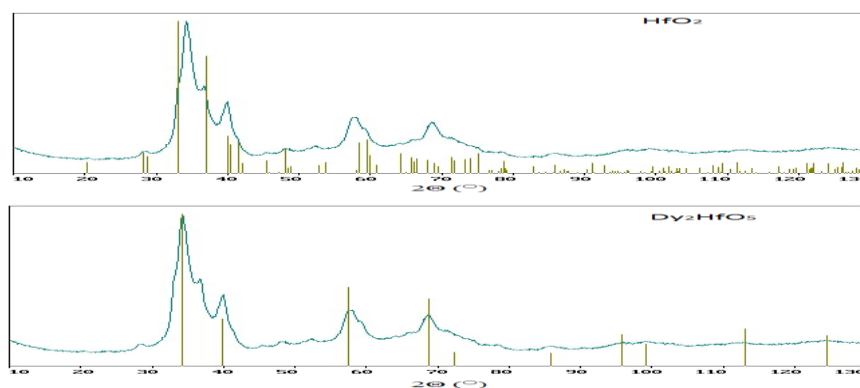


Рисунок 3 - Рентгенофазовый анализ смеси Dy₂O₃-HfO₂ после МХО при продолжительности обработки: 5 – 15 мин. 2θ (°)

Количественный анализ и структурный тип соединений механоактивированной смеси оксидов диспрозия и гафния

Фаза	стр.тип	Об.доля, %	Вес.доля, %	Периоды, анг.
Hf O ₂ (type C43)	mP12/3	53.8 ± 0.1	56.3 ± 0.1	A= 5.102 B= 5.205 C= 5.334 β = 98.165
Dy ₂ Hf O ₅ (type C1)	cF12/1	46.2 ± 0.1	43.7 ± 0.1	A= 5.268

Полное превращение исходных оксидов в нанокристаллический гафнат диспрозия происходит при обработке смесей в течение 40мин. (рисунок 4, таблица 3).

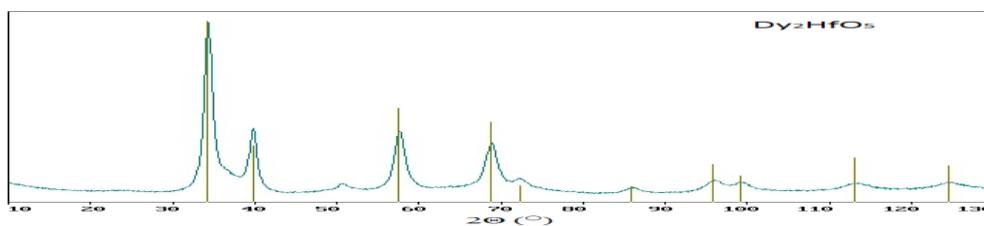


Рисунок 4 - Рентгенофазовый анализ смеси Dy₂O₃*HfO₂ после МХО при продолжительности обработки 40 мин.

Таблица 3

Количественный анализ и структурный тип соединения механоактивированной смеси оксидов диспрозия и гафния в течение 30 мин.

Фаза	стр.тип	Об.доля, %	Вес.доля, %	Периоды, анг.
Dy ₂ Hf O ₅ (type C1)	cF12/1	100.0 ± 0.0	100.0 ± 0.0	A= 5.248±2·10 ⁻³

Полученные результаты говорят о том, что механоактивация эквимолярной смеси оксидов диспрозия и гафния в течение 40мин.

приводит к образованию однофазного гафната диспрозия с кубической решеткой типа флюорита с параметрами решетки 5,248 ± 2·10⁻³анг.

На рисунках 5, 6 представлены результаты определения гранулометрического состава и микроструктуры частиц порошка гафната диспрозия, поученного механической обработкой смеси оксидов диспрозия и гафния.

На основании данных исследования гранулометрического состава порошка и сканирующей электронной микроскопии установлено, что синтезированные механохимической активацией порошки гафната диспрозия представляют собой нанокристаллические частицы неравноосной формы с диаметрами 10 – 99 нм, объединенные в агломераты размером до 600 нм.

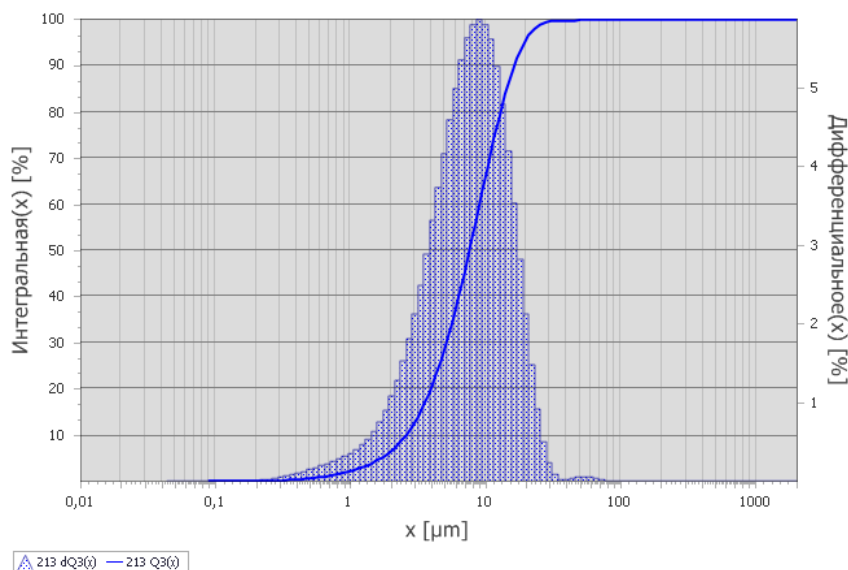


Рисунок 5 - Гистограмма распределения по размерам частиц порошка Dy₂HfO₅, полученного механосинтезом смеси оксидов диспрозия и гафния

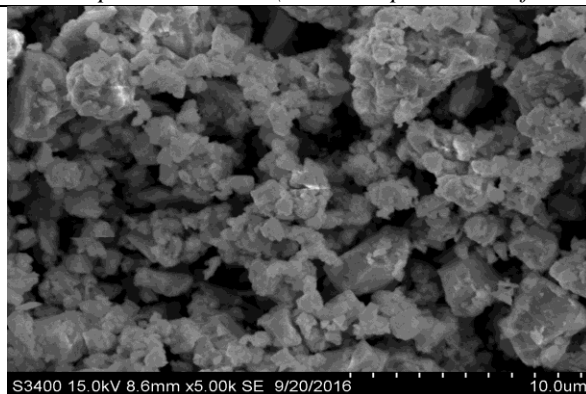


Рисунок 6 - СЭМ-изображение частиц порошка Dy_2HfO_5 , полученного механосинтезом смеси оксидов диспрозия и гафния.

ПЭМ-снимок (рисунок 7) подтверждает, что порошок находится в сильно агломерированном состоянии и преимущественно состоит из ультрадисперсных кристаллических частиц. Кроме того, наблюдается некоторое количество частиц сферической формы размером до 60 нм.

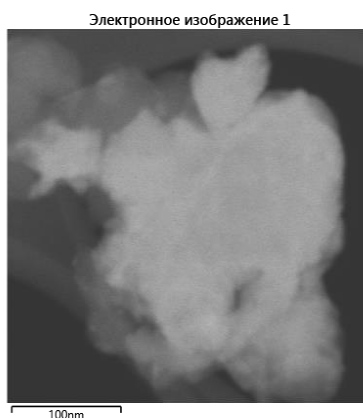


Рисунок 7 – ПЭМ - изображение агломерата порошка Dy_2HfO_5 , полученного механосинтезом оксидов диспрозия и гафния.

В таблице 4 приведены некоторые свойства порошка гафната диспрозия, полученного механосинтезом.

Таблица 4

Свойства порошков гафната диспрозия, полученного механосинтезом.

Материал	Текучесть, с	Насыпная плотность, г/см ³	Удельная поверхность, м ² /г	Ср. размер агломератов, нм	Размер частиц, нм
Dy_2HfO_5 мехсинтез.	Не течет	1,87-1,89	16-24	200 - 300	60-95

Данные энергодисперсионного анализа элементного состава для отдельной сферической частицы представлены на рисунках 8, 9 и в таблице 5.

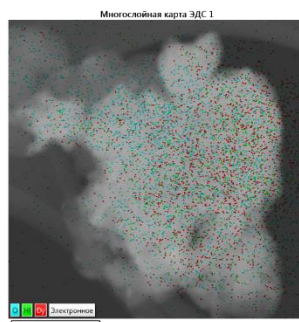


Рисунок 8 – ПЭМ – изображение частицы порошка Dy_2HfO_5 , полученного механосинтезом оксидов диспрозия и гафния (τ мхо- 40мин).

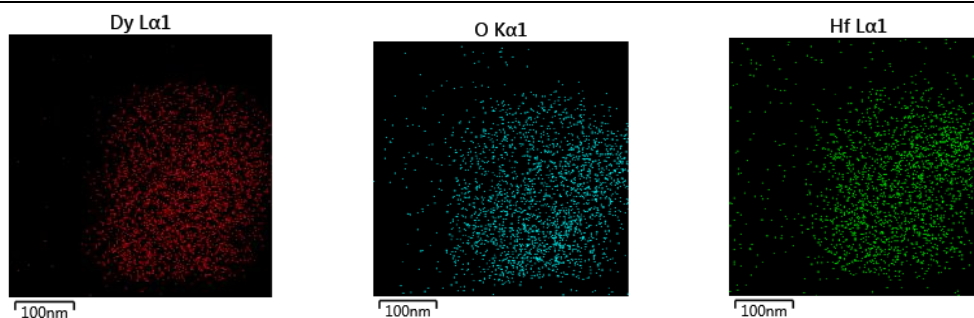


Рисунок 9 – Энергодисперсионный рентгеновский анализ Dy_2HfO_5 , полученного механосинтезом

Статистический анализ ЭДС данных по элементному составу частиц показывает, что они содержатся практически в стехиометрическом соотношении (рисунок 9, таблица 5).

Таблица 5

Статистический анализ ЭДС данных по элементному составу частиц

Элемент	Тип линии	к-Фактор	Поправка на поглощение	Вес.%	Атом.%
O	K серия	1.455	1.00	26,76	76,96
Dy	L серия	2.262	1.00	59,03	17,17
Hf	L серия	2.449	1.00	14,21	3,79
Сумма:				100.00	100.00

Сравнение КР - спектров гафната диспрозия, полученного механоактивацией оксидов гафния и диспрозия (рисунок 10), не обнаруживает пиков, относящихся к оксидам диспрозия ($371-373\text{ см}^{-1}$)

[18] и оксидов гафния ($395,495, 516, 667\text{ см}^{-1}$) [19], что также подтверждает образование однофазного гафната диспрозия и отсутствие отдельных фаз оксидов в заметном количестве.

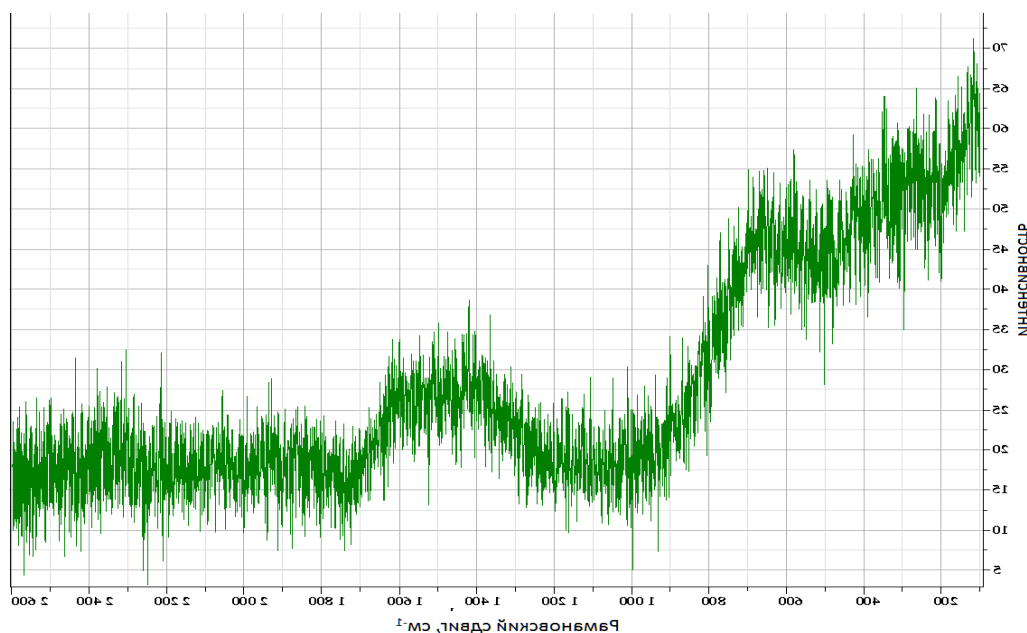


Рисунок 10 - Спектры комбинационного рассеяния гафната диспрозия, полученного механоактивацией смеси оксидов

Широкая полоса поглощения $200 - 580\text{ см}^{-1}$ и широкий пик поглощения с максимумом $\sim 680\text{ см}^{-1}$ характерны для деформационных колебаний O- Hf -O связей, а высокочастотные полосы с пиком поглощения в области $1400-1600\text{ см}^{-1}$ соответствуют, по видимому, валентным колебаниям [18-19].

Исследования синтезированного механохимией порошка Dy_2HfO_5 (рисунок 11) с применением метода ПЭМ выявили типичную полосчатую структуру из атомных плоскостей, характерную для кристаллического состояния (область 1), а также структуру с разупорядоченным состоянием атомов, близким к аморфному (область 2).

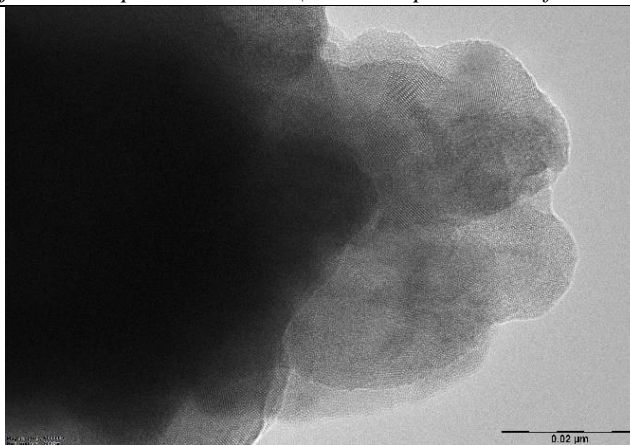


Рисунок 11 - Микрофотография структуры Dy_2HfO_5 , полученного механохимическим способом

Выводы

1. В результате проведенных исследований установлена возможность получения нанокристаллического порошка гафната диспрозия механохимической обработкой оксидов гафния и диспрозия.

2. Методами РФА, растровой электронной спектроскопии, Раман – спектроскопии (КР – спектры), ПЭМ, РФА изучены структура и свойства полученного порошка гафната диспрозия.

3. Сравнение КР - спектров гафната диспрозия, полученного механоактивацией смеси оксидов гафния и диспрозия, не обнаруживает пиков, относящихся ни к оксидам диспрозия, ни к оксидам гафния, что подтверждает образование однофазного гафната диспрозия.

4. Исследования синтезированного механохимией порошка Dy_2HfO_5 с применением метода ПЭМ выявили типичную полосчатую структуру, характерную для кристаллического состояния, а также структуру с разупорядоченным состоянием атомов, близким к аморфному.

Работа выполнена по гранту РФФИ 19-08-00273

Литература

1. Sickafus Kurt E., Grimes Robin W., Valdez James A., Cleave Antony, Ming Tang, Ishimaru Manabu, Corish Siobhan M., Stanek Christopher R. & Uberuaga Blas P. Radiation-induced amorphization resistance and radiation tolerance in structurally related oxides. // Nature Materials. 2007. No. 6. P. 217 – 223.

2. Рисованый В.Д., Варлашова Е.Е., Фридман С.Р., Пономаренко В.Б., Щеглов А.В. Сравнительные характеристики поглощающих

кластерных сборок ВВЭР-1000 и PWR. //Атомная энергия. 1998. т. 84. в. 6. С. 508–513.

3. Белаш Н.Н., Куштым А.В., Татарин В.Р., Чернов И.А. Анализ разработок конструкций и материалов пэлов ПС СУЗ повышенной работоспособности. //Ядерные и радиационные технологии. 2007. т. 7. No. 3-4. С. 18-28.

4. Рисованый В.Д., Захаров А.В., Муралева Е.М. Новые перспективные поглощающие материалы для ядерных реакторов на тепловых нейтронах. //Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение (86).2005. No. 3. С. 87-93.

5. Risovany V.D., Zakharov A.V., Muraleva E.M., Kosenkov V.M., Latypov R.N. Dysprosium hafnate as absorbing material for control rods. // Journal of Nuclear Materials. 2006. v. 355. P. 163-170.

6. Fridman S.R., Risovany V.D. et al. Radiation stability of WWER-1000 CPS AR absorber element with boron carbide, VANT. S: Physics of radiation damages and radiation science of materials. 2001. No2. P. 84-90.

7. Перова Е.Б., Спиридонов Л.Н., Комисарова Л.Н. Фазовые равновесия в системе $HfO_2-Dy_2O_3$. //Известия Академии наук СССР. Неорганические материалы. 1982. т. 8. No 10. С. 1878 – 1882.

8. Махмудов Ф. А. Шаймарданов Э. Н., Кабгов Х.Б. Получение и свойства наноструктурированных оксидов диспрозия. // Ж. Доклады Академии Наук Республики Таджикистан. 2013. Вып. 2. том 56. С. 130-134.

9. Sinha A, Sharma V.P. Development of dysprosium titanate based ceramics. //J. of the Amer. Ceram. Soc. 2005. No 2. P.238-241.

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 539.3:534.26

Пешков Никита Юрьевич
аспирант,

Россия, Тула, Тульский государственный университет.

РАССЕЯНИЕ ЗВУКОВЫХ ВОЛН В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ ВОЛНОВОДЕ НА ЭЛЛИПСОИДЕ С НЕОДНОРОДНЫМ ПОКРЫТИЕМ

Peshkov Nikita Yurievich
Postgraduate

Russia, Tula, Tula, Tula State University.

SOUND WAVES SCATTERING IN A CYLINDRICAL WAVEGUIDE BY AN ELLIPSOID WITH AN INHOMOGENEOUS COVER

Аннотация. Представлено решения задачи дифракции плоской, цилиндрической и сферической звуковых волн на упругом однородном эллипсоиде, на поверхность которого нанесено слоисто-неоднородное покрытие. Эллипсоид находится в цилиндрическом волноводе бесконечной длины, заполненном идеальной жидкостью. Боковые стенки волновода являются абсолютно жесткими или импедансными. Решение проводится на основе линейной теории упругости и модели распространения малых возмущений в идеальной жидкости с помощью метода конечных элементов (МКЭ). Приведены результаты расчета диаграмм направленности рассеянного звукового поля, которые показывают влияние физических параметров эллипсоида и волновода на дифракцию звука.

Abstract. The solution of the diffraction problem for the plane, cylindrical and spherical sound waves on a homogeneous elastic ellipsoid, whose surface is covered by an inhomogeneous layer, is presented. The ellipsoid is located in a cylindrical waveguide of infinite length filled with an ideal fluid. The waveguide's side walls are hard or impedance. The solution is realized at the base of the linear theory of elasticity and the model of propagation of the small vibrations in an ideal fluid using the finite element method (FEM). The results of calculation of the directivity patterns of the scattered sound field, which show the influence of the physical parameters of the ellipsoid and waveguide at sound diffraction, are presented.

Ключевые слова: однородный упругий эллипсоид, неоднородный упругий слой, цилиндрический волновод, рассеянное поле, потенциал смещений, импеданс, излучающая граница, метод конечных элементов, датчик, диаграмма рассеяния

Key words: homogeneous elastic ellipsoid, inhomogeneous elastic layer, cylindrical waveguide, scattered field, displacement potential, impedance, radiating boundary, finite element method, sensor, scattering pattern

Введение

Решение задачи дифракции звуковых волн на упругом теле существенно зависит от формы тела и свойств его материала. Полученное решение задачи дифракции может быть использовано для идентификации параметров упругого тела. Такие решения могут быть использованы при разработке методов исследования в ультразвуковой диагностике, дефектоскопии и гидроакустике.

Исследование дифракции звуковых волн на упругих эллипсоидальных телах представляет значительный интерес. Эллипсоидальной геометрией охватывается большое многообразие форм. Многие реальные объекты хорошо аппроксимируются телами упомянутой формы. Дифракция акустических волн на упругих однородных сфероидах изучалась в ряде работ, например, [1-6]. В [7] рассматривался упругий неоднородный сфероидальный рассеиватель.

Изменение характеристик рассеяния звука упругих тел можно осуществить с помощью покрытий в виде непрерывно-неоднородного упругого слоя. Дифракция звуковых волн на цилиндрических, сферических и сфероидальных

упругих однородных телах с непрерывно-неоднородными покрытиями, находящихся в безграничном пространстве, исследовалась в [8-14].

Широкие возможности для исследования задач дифракции дает использование метода конечных элементов (МКЭ) [15-17], который уже много лет с успехом применяется в решении различных практических задач гидродинамики и теории упругости. В монографии [17] подробно изложены различные аспекты использования МКЭ при решении задач о рассеянии звука объектами различного типа: жесткими, мягкими, упругими.

В данной работе представлено решение задачи дифракции плоской, цилиндрической и сферической акустических волн упругим эллипсоидом с неоднородным покрытием, находящимся в цилиндрическом волноводе бесконечной длины, заполненном идеальной жидкостью и имеющем абсолютно жесткие (а. ж.) или импедансные (и.) боковые стенки (б. с.), с использованием метода конечных элементов.

Постановка задачи

Пусть внутри цилиндрического волновода бесконечной длины T радиуса r_0 с центром O и осью T_1T_2 , заполненного идеальной жидкостью с плотностью ρ_0 и скоростью звука c_0 , находится упругий объект E , внутренняя (основная) часть которого – однородный упругий эллипсоид с полуосями a , b , c и центром O_1 . На поверхность эллипсоида нанесен неоднородный упругий слой толщины h . Считается заданным \mathbf{d} – смещение точки O_1 от точки O . Также

известны физические характеристики (плотность, модуль Юнга, коэффициент Пуассона) для однородной части тела – ρ_1 , E_1 , ν_1 и для внешнего слоя – $\rho_2(\mathbf{r})$, $E_2(\mathbf{r})$, $\nu_2(\mathbf{r})$, где \mathbf{r} – радиус-вектор точки пространства. Боковые стенки волновода являются абсолютно жесткими или импедансными.

Из акустического пространства волновода на тело падает монохроматическая звуковая волна (плоская, цилиндрическая или сферическая). Полагается, что потенциал смещений Ψ_p частиц жидкости в ней имеет вид:

$$\text{а) } \Psi_p = e^{i(\mathbf{k}_0 \cdot \mathbf{r} - \omega t)}, \text{ б) } \Psi_p = H_0^{(1)}(k_0 r_s) e^{-i\omega t}, \text{ в) } \Psi_p = \frac{e^{i(k_0 r_s - \omega t)}}{r_s}, \quad (1)$$

где ω – круговая частота; t – время; а) \mathbf{k}_0 – волновой вектор падающей плоской волны

($|\mathbf{k}_0| = k_0 = \omega/c_0$); б) $H_0^{(1)}$ – функция Ханкеля первого рода нулевого порядка;

$r_s = |(\mathbf{r} - \mathbf{r}_{s0}) \times \mathbf{e}_{sa}| / |\mathbf{e}_{sa}|$ – расстояние от оси цилиндрического волнового источника до текущей точки; \mathbf{r}_{s0} – точка, через которую проходит ось источника; \mathbf{e}_{sa} – направление оси источника; в)

$r_s = |\mathbf{r} - \mathbf{r}_{s0}|$ – расстояние от сферического волнового источника до текущей точки; \mathbf{r}_{s0} – центр источника.

Поскольку падающая волна является гармонической, то для функций, зависящих и от координат и от времени, зависимость от времени $e^{-i\omega t}$ будем опускать.

В результате взаимодействия с препятствием падающая волна искажается и образуется рассеянная волна, потенциал смещений Ψ_s частиц жидкой среды которой требует определения в задаче.

Геометрическая схема задачи представлена на рис. 1. Условно на нем показаны: однонаправленными стрелками – направление вектора \mathbf{k}_0 плоской звуковой волны из (1.а); двунаправленной стрелкой и крестовым маркером

– ось e_{sa} цилиндрического волнового источника и точка \mathbf{r}_0 , через которую она проходит, из (1.б); маркером-звездочкой – центр \mathbf{r}_0 сферического волнового источника из (1.в).

Введем ортогональную декартову систему координат $Oxyz$ так, чтобы направление оси Ox совпадало с направлением вектора $\mathbf{T}_1\mathbf{T}_2$. Также введем локальную систему координат $O_1x_1y_1z_1$ так, чтобы уравнение поверхности Γ_1 однородной части рассеивателя E имело каноническую форму

$$\left(\frac{x_1}{a}\right)^2 + \left(\frac{y_1}{b}\right)^2 + \left(\frac{z_1}{c}\right)^2 = 1.$$

Введем параметр q – расстояние от поверхности Γ_1 внутренних точек неоднородного упругого слоя тела E . Тогда локальные координаты точки $M_2(x_2, y_2, z_2)$ внутри внешнего слоя, соответствующей точке $M_1(x_1, y_1, z_1)$ поверхности Γ_1 , можно представить в следующем виде

$$x_2 = x_1 + qn_x, \quad y_2 = y_1 + qn_y, \quad z_2 = z_1 + qn_z,$$

где $0 \leq q \leq h$; n_x, n_y, n_z – компоненты внешней единичной нормали \mathbf{n} к поверхности Γ_1 в точке M_1 в системе координат $O_1x_1y_1z_1$. Значения n_x, n_y, n_z зависят от параметров a, b, c и координат (x_1, y_1, z_1) следующим образом

$$n_x = \frac{x_1(bc)^2}{g}, n_y = \frac{y_1(ac)^2}{g}, n_z = \frac{z_1(ab)^2}{g},$$

$$\text{где } g = \sqrt{(x_1(bc)^2)^2 + (y_1(ac)^2)^2 + (z_1(ab)^2)^2}.$$

Ориентацию осей локальной системы координат $O_1x_1y_1z_1$ по отношению к глобальной $Oxyz$ будем задавать углами Эйлера α, β, γ так, что координаты связаны выражением

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = M_\alpha \cdot M_\beta \cdot M_\gamma \cdot \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix} + \mathbf{d},$$

где $M_\alpha = \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$, $M_\beta = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta & -\sin \beta \\ 0 & \sin \beta & \cos \beta \end{pmatrix}$ и $M_\gamma = \begin{pmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$ –

матрицы поворота. Эти углы Эйлера будем трактовать как углы поворота тела E при задании его ориентации по отношению к системе координат $Oxyz$.

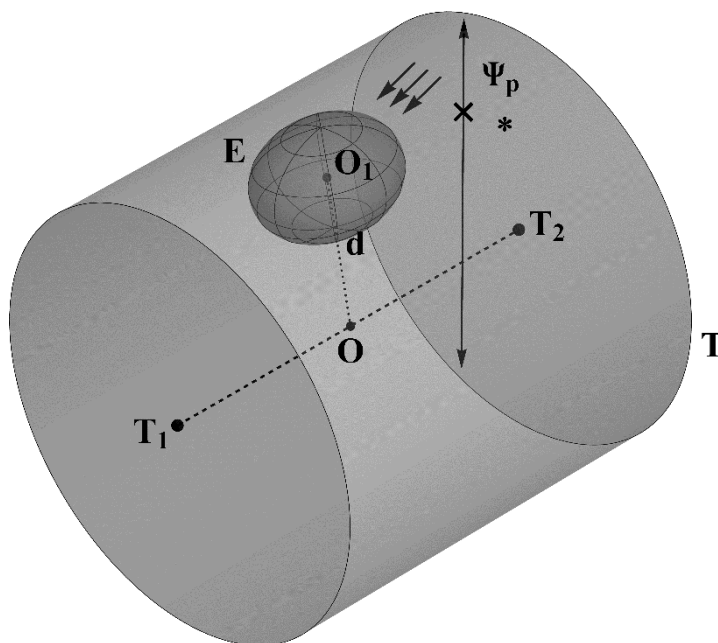


Рис. 1. Геометрия задачи

Схематично, геометрия задачи после введения систем координат представлена на рис. 2. Упругое тело на нем представлено сечениями поверхности E координатными плоскостями системы координат $O_1x_1y_1z_1$. На осях O_1x_1, O_1y_1, O_1z_1 указаны точки $A', A''; B', B''; C', C''$ с локальными координатами $(a, 0, 0), (a + h, 0, 0); (0, b, 0), (0, b + h, 0); (0, 0, c), (0, 0, c + h)$.

Обозначим области, занимаемые различными средами так: Ω_0 – область цилиндрического волновода, занятая идеальной жидкостью; Ω_1 – область эллипсоида, занятая однородной упругой средой ($[x_1/a]^2 + [y_1/b]^2 + [z_1/c]^2 \leq 1$); Ω_2 – неоднородный слой упругого препятствия ($x_2 = x_1 + qn_x, y_2 = y_1 + qn_y, z_2 = z_1 + qn_z, (x_1, y_1, z_1) \in \Gamma_1, 0 \leq q \leq h$).

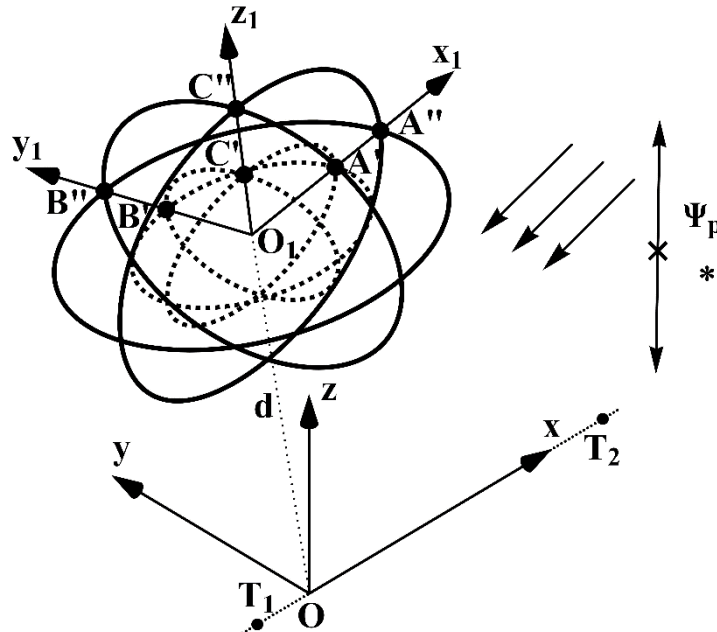


Рис. 2. Введение систем координат

В области Ω_0 движение частиц идеальной жидкости определяется потенциалами смещений в падающей Ψ_p и рассеянной Ψ_s волнах. Смещение \mathbf{u}_0 и давление p_0 в области Ω_0 определяются через эти потенциалы так [18]

$$\mathbf{u}_0 = \text{grad}(\Psi_0), \quad p_0 = \rho_0 \omega^2 \Psi_0, \quad (2)$$

где $\Psi_0 = \Psi_p + \Psi_s$ – потенциал смещений в суммарном акустическом поле в области Ω_0 . При этом потенциал Ψ_s должен удовлетворять уравнению Гельмгольца [18]

$$\Delta \Psi_s + k_0^2 \Psi_s = 0 \quad (3)$$

и условиям излучения на бесконечности

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \Psi_s = O\left(\frac{1}{r}\right), \quad \lim_{r \rightarrow \infty} \left[\left(\frac{\partial \Psi_s}{\partial r} - ik_0 \Psi_s \right) \right] = o\left(\frac{1}{r}\right), \quad (4)$$

где $r = |\mathbf{r}|$.

Предполагается, что движение частиц в препятствии подчиняется законам линейной теории упругости [19]. Обозначим вектор смещений и тензор напряжений в а) Ω_1 через \mathbf{u}_1 и σ_1 , б) Ω_2 через \mathbf{u}_2 и σ_2 соответственно. Тогда гармонические колебания частиц тела E описываются уравнениями движения

$$\text{div}(\sigma_\nu) = -\rho_\nu \omega^2 \mathbf{u}_\nu \quad (\nu = 1, 2), \quad (5)$$

где $\text{div}(\sigma_{\nu})$ – первый инвариант ковариантной производной тензора напряжений σ_{ν} .

Тензор напряжений выражается через компоненты вектора смещений посредством закона Гука, так что уравнения (5) можно рассматривать

$$\mathbf{u}_1|_{\Gamma_1} = \mathbf{u}_2|_{\Gamma_1}, \sigma_{1nn}|_{\Gamma_1} = \sigma_{2nn}|_{\Gamma_1}, \sigma_{1n\tau}|_{\Gamma_1} = \sigma_{2n\tau}|_{\Gamma_1} \quad (\tau = 1, 2), \quad (6)$$

где σ_{ijn} – компоненты скалярных произведений $\mathbf{n} \cdot \sigma_i$ ($i = 1, 2, j = n, \tau$); \mathbf{n} – внешняя нормаль к Γ_1 ; τ – индекс, определяющий два касательных к Γ_1 направления.

$$u_{1n}|_{\Gamma_2} = u_{0n}|_{\Gamma_2}, \sigma_{1nn}|_{\Gamma_2} = -p_0|_{\Gamma_2}, \sigma_{1n\tau}|_{\Gamma_2} = 0 \quad (\tau = 1, 2), \quad (7)$$

где n – индекс, соответствующий проекции на нормаль (индекс τ на касательные) уже к поверхности Γ_2 . Величины u_{0n} и p_0 выражаются через потенциал Ψ_0 в соответствии с (2).

$$\text{а) } u_{0n}|_{\tilde{\Gamma}_0} = 0, \text{ б) } p_0|_{\tilde{\Gamma}_0} = -i\omega Z_i u_{0n}|_{\tilde{\Gamma}_0}, \quad (8)$$

где б) Z_i – входной акустический импеданс внешней по отношению к Ω_0 среды. Таким образом, в математической постановке задача состоит в нахождении решений уравнений (3) и (5), удовлетворяющих граничным условиям (6), (7), (8) и условиям излучения (4).

Решение задачи

Решение задачи будем проводить численно с использованием метода конечных элементов на основе подхода [20, 21], основанного на

как системы дифференциальных уравнений второго порядка относительно компонент векторов смещений \mathbf{u}_1 и \mathbf{u}_2 .

На поверхности Γ_1 соединения внешнего неоднородного слоя и эллипсоида должны быть непрерывными смещения и тензор напряжений:

На внешней поверхности тела – Γ_2 – поверхности соприкосновения жидкости и упругого материала должны быть непрерывными нормальная компонента вектора смещений и тензора напряжений

Наконец, на границе области $\Omega_0 - \tilde{\Gamma}_0$ – боковых стенках волновода в зависимости от их типа (а) абсолютно жестких или б) импедансных должно выполняться условие

искусственном ограничении бесконечной области цилиндрического волновода с помощью условий, моделирующих излучающие границы. Эти условия позволяют моделировать излучение минимального отражения вводимой границей области волны соответствующего типа в окружающую среду. Следовательно, если поле, формируемое объектами внутри области имеет характер близкий типу излучающей границы, то его отражение, направленное внутрь области, оказывается минимальным. Граничное условие, имитирующее излучающую границу, имеет вид

$$\frac{\partial \Psi_0}{\partial \mathbf{n}} + \theta_{\zeta} \Psi_s + \eta_{\zeta} \Delta_{\parallel} \Psi_s = 0 \quad (\zeta = p, c, s), \quad (9)$$

где \mathbf{n} – внешняя нормаль к границе; ζ – индекс соответствующий распространению плоской (p при $\theta_p = ik_0$ и $\eta_p = i/(2k_0)$), цилиндрической (c при $\theta_c = ik_0 + 1/(2r_s) - 1/[8r_s(1 + ik_0r_s)]$ и $\eta_c = r_s/[2(1 + ik_0r_s)]$) или сферической (s при $\theta_s = ik_0 + 1/r_s$ и $\eta_s = -\eta_c$) волны; Δ_{\parallel} – оператор Лапласа в касательной плоскости для текущей точки границы.

Усечем бесконечную область Ω_0 , вводя в рассмотрение две торцевые излучающие границы $\hat{\Gamma}_0$, расположенные перпендикулярно оси

цилиндрического волновода T_1T_2 на расстояниях OQ_1 и OQ_2 от начала системы координат

Охуз, так, чтобы внутри поверхности $\Gamma_0 = \tilde{\Gamma}_0 \cup \hat{\Gamma}_0$ оказалось препятствие E и источник звуковых колебаний. При этом минимальное расстояние от упругого тела до

границ $\hat{\Gamma}_0$ должно иметь порядок характерного размера упругого тела $R = (a + b + c)/3 + h$.

Геометрическая схема задачи, модифицированная добавлением излучающих границ, представлена на рис. 3.

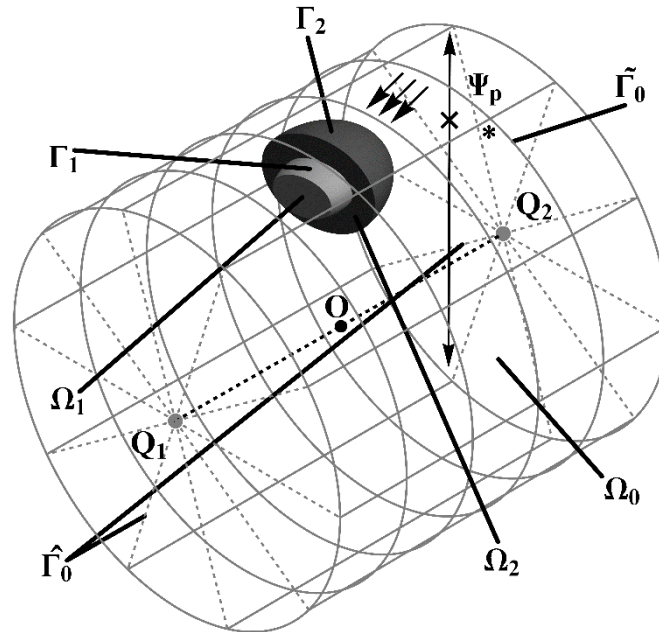


Рис. 3. Геометрия задачи с учетом границ $\hat{\Gamma}_0$

В скорректированной постановке задачи условия излучения (4) заменяются одним из граничных условий (9).

Проведем дискретизацию совокупности областей жидкой и упругих сред $\Omega = \Omega_0 \cup \Omega_1 \cup \Omega_2$ путем разбиения их на конечные элементы в форме тетраэдров.

Иллюстрация этой процедуры представлена на рис. 4.

Все неизвестные функции в Ω представляются в виде линейных комбинаций координатных функций узлов [17]. В частности для потенциала Ψ_s можно записать

$$\Psi_s(\mathbf{r}) = \sum_{k=1}^K \psi_{s_k} f_k(\mathbf{r}), \tag{10}$$

где ψ_{s_k} – узловые значения потенциала в области Ω ; $f_k(\mathbf{r})$ – координатные функции конечно-элементной модели; K – количество узлов. Будем считать, что множество значений

$k = \overline{1, K}$ охватывает узлы всей КЭ-сетки области Ω , а в узлах, не относящихся к Ω_0 , положим $\psi_{s_k} \equiv 0$.

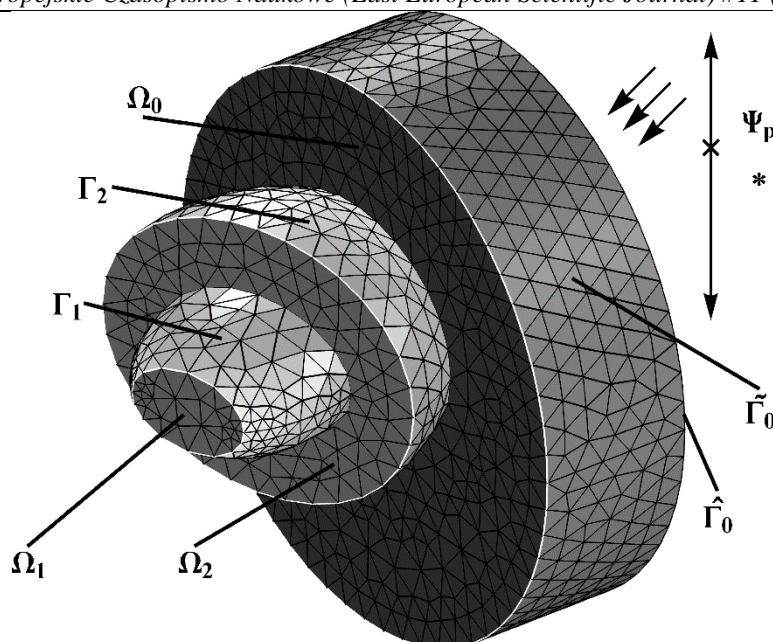


Рис. 4. Схема разбиения Ω на конечные элементы

В форме, аналогичной (10), будем искать и смещение в упругом препятствии (в областях Ω_1 и Ω_2)

$$\mathbf{u}(\mathbf{r}) = \sum_{k=1}^K \mathbf{U}_k f_k(\mathbf{r}).$$

Здесь \mathbf{u} рассматривается как общее обозначение для смещений \mathbf{u}_1 и \mathbf{u}_2 , введенных выше.

В результате граничные условия (6), (7), (8), и одно из (9) будут содержать в качестве неизвестных только узловые значения функций Ψ_s , \mathbf{u}_1 и \mathbf{u}_2 из ограниченной области Ω . После этого можно решать краевую задачу для уравнений (3), (5) с указанными граничными условиями стандартной технологией МКЭ [17]. В результате решения находим все узловые значения неизвестных функций Ψ_{s_k} , \mathbf{U}_k ($k = \overline{1, K}$).

Численные исследования

Представленная модель решения задачи была использована для численных исследований определения рассеянного поля звуковой волны (плоской, цилиндрической или сферической) в математическом пакете MATLAB [22].

При проведении численных исследований анализировались значения потенциала смещений в рассеянной звуковой волне Ψ_s , полученные в пакете конечно-элементного анализа COMSOL Multiphysics [23], на окружности V радиуса r_0 с центром F . Окружность, в свою очередь,

размещалась на боковой поверхности цилиндрического волновода параллельно границам $\hat{\Gamma}_0$.

В качестве функциональных зависимостей параметров упругой среды в неоднородном слое рассматривались зависимости $w_1(h) = 1/2 + q/h$ и $w_2(h) = 3/2 - q/h$. Зависимость параметров материала неоднородного слоя от координат представлялась в виде

$$\rho_2(q) = \rho_1 w(q), \quad E_2(q) = E_1 w(q), \\ \nu_2(q) = \nu_1 w(q),$$

где $w(q)$ – одна из функций $w_1(q)$, $w_2(q)$ или $w_0(q) \equiv 1$ (последняя предполагает постоянство значения параметра во всем слое).

Предполагались следующие геометрические характеристики цилиндрического волновода: $r_0 = 3 \text{ м}$, $OQ_1 = OQ_2 = 4 \text{ м}$. В качестве идеальной среды, заполняющей область Ω_0 , использовалась жидкость с плотностью $\rho_0 = 1000 \text{ кг/м}^3$ и скоростью звука $c_0 = 1485 \text{ м/с}$. В случае, когда боковые стенки цилиндрического волновода являются импедансными, входной акустический импеданс внешней по отношению к Ω_0 среды определялся как $Z_i = -\rho_0 c_0$.

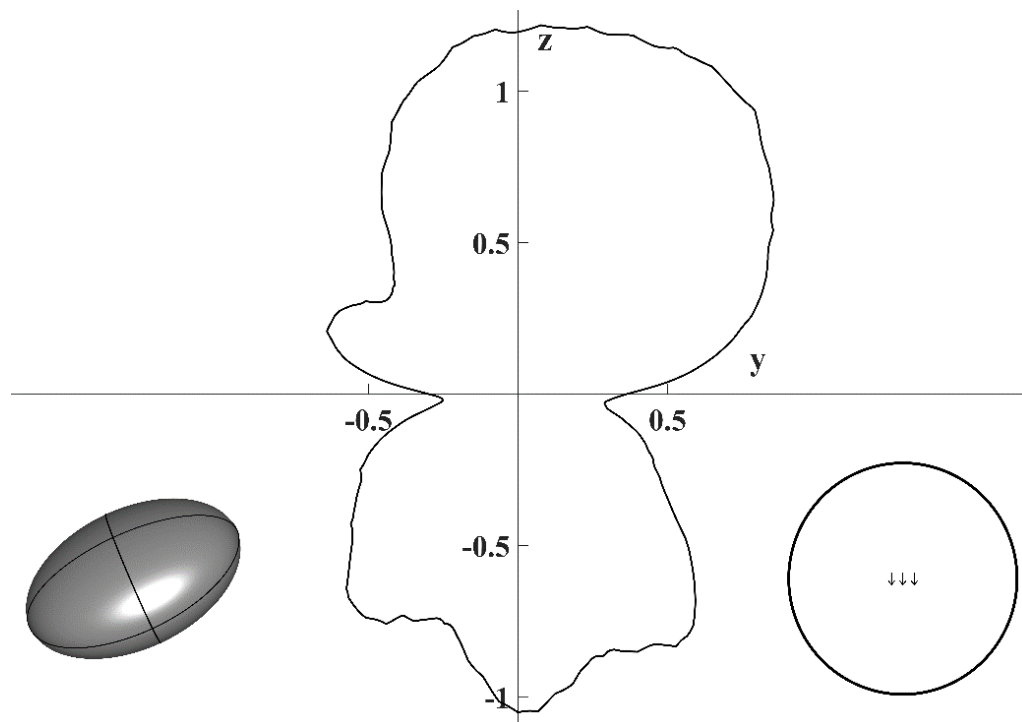
Рассматривалось упругое препятствие, имеющее фиксированные геометрические параметры: $a = 1$ м, $b = 0.75$ м, $c = 0.5$ м; $h = 0.3$ м; $\mathbf{d} = (-1, 0, 0)$ м, $(\alpha, \beta, \gamma) = (\pi/3, \pi/4, \pi/5)$. Плотность и модули упругости в области Ω_1 задавались так: $\rho_1 = 2700$ кг/м³, $E_1 = 6,9443 \cdot 10^{10}$ Па и $\nu_1 = 53/158$.

Частота падающей волны выбиралась такой, что $k_0 R = 4.4$, а ее геометрические характеристики устанавливались так: а) плоская – $\tilde{\mathbf{k}}_0 = -(\sqrt{9/10}, 0, 1/\sqrt{10})$, где $\mathbf{k}_0 = k_0 \tilde{\mathbf{k}}_0$; б) цилиндрическая – $\mathbf{e}_{sa} = (0, 0, 1)$ и $\mathbf{r}_{s_0} = (2, 0, 1.5)$ м; в) сферическая – $\mathbf{r}_{s_0} = (2, 0, 1.5)$ м.

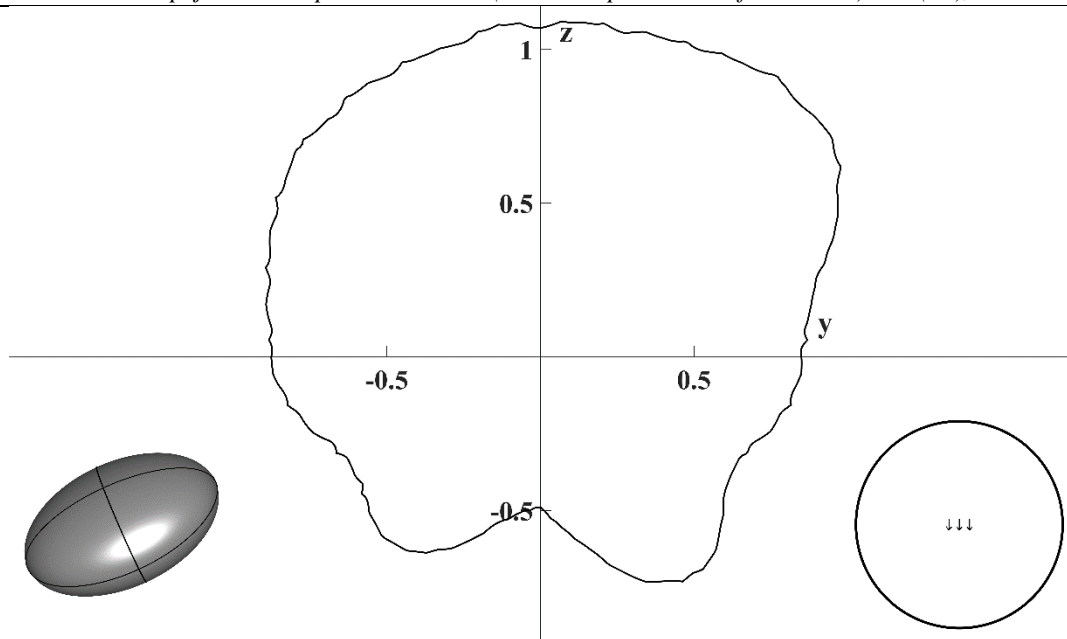
Центр F контура V имел следующие координаты а) $\mathbf{OO}_1 \cdot \mathbf{e}_x$ или б) $\frac{(\mathbf{OO}_1 + \mathbf{r}_{s_0}) \cdot \mathbf{e}_x}{2}$ (\mathbf{e}_x – орт оси Ox). Выражение а) соответствует варианту плоской волны, а б) – цилиндрической и сферической.

На рис. 5.а, 5.б; 6.а, 6.б; 7.а, 7.б представлены диаграммы рассеяния плоской, цилиндрической и сферической волн соответственно. Сплошной линией на них представлена величина $|\Psi_s|$. На графиках под кривой $|\Psi_s|$ слева от оси Oz схематично показана ориентация упругого

препятствия E , а справа – конфигурация источника звуковых колебаний, подобно изображенному на рис. 1 – 4 (окружность соответствует контуру границы $\hat{\Gamma}_0$) при наблюдении вдоль оси Ox .

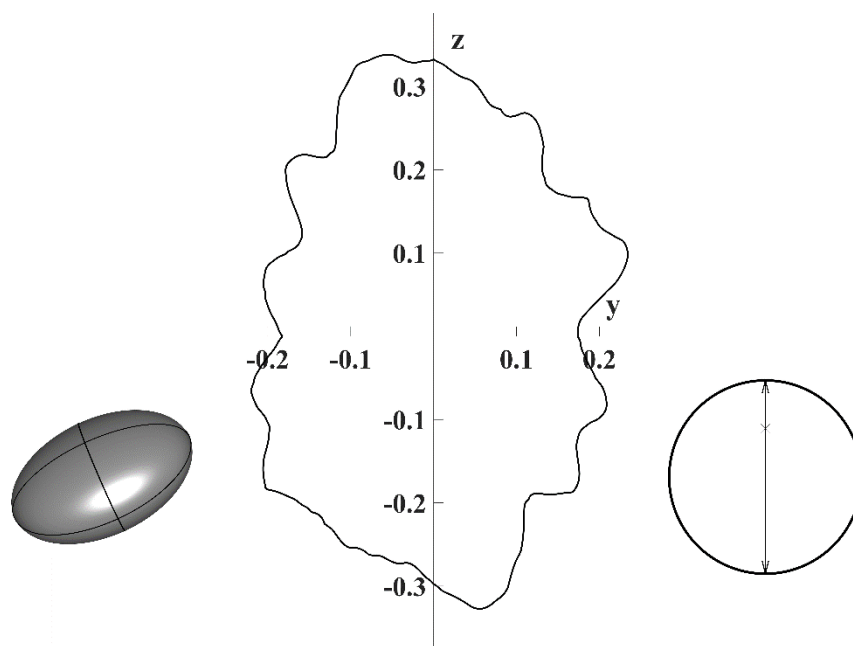


а) а. ж. б. с. для Ω_0

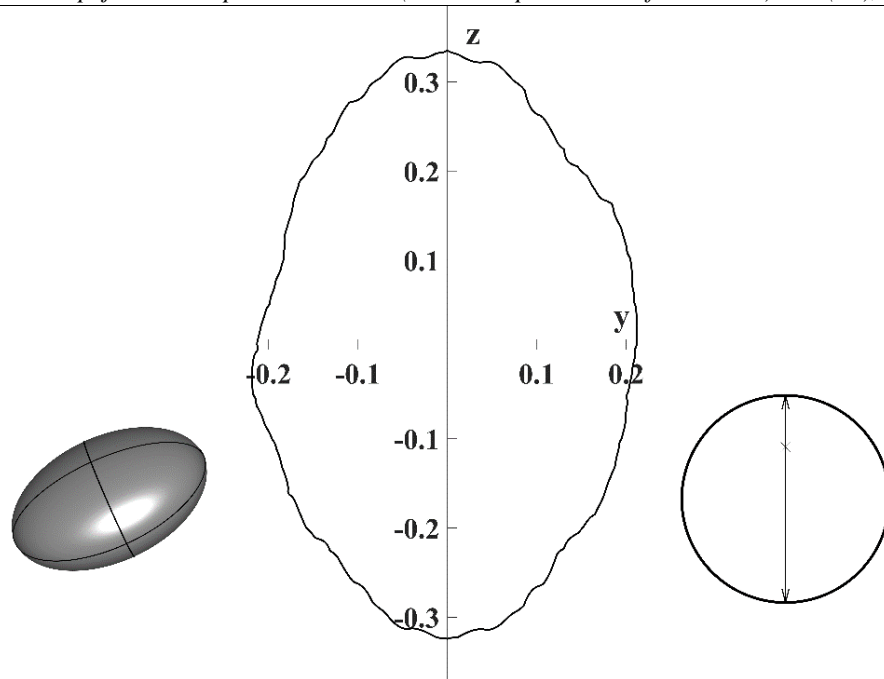


б) и б. с. для Ω_0

Рис. 5. Диаграммы $|\Psi_S|$ для плоской звуковой волны в случае $w(q) = w_0(q) \equiv 1$ для E

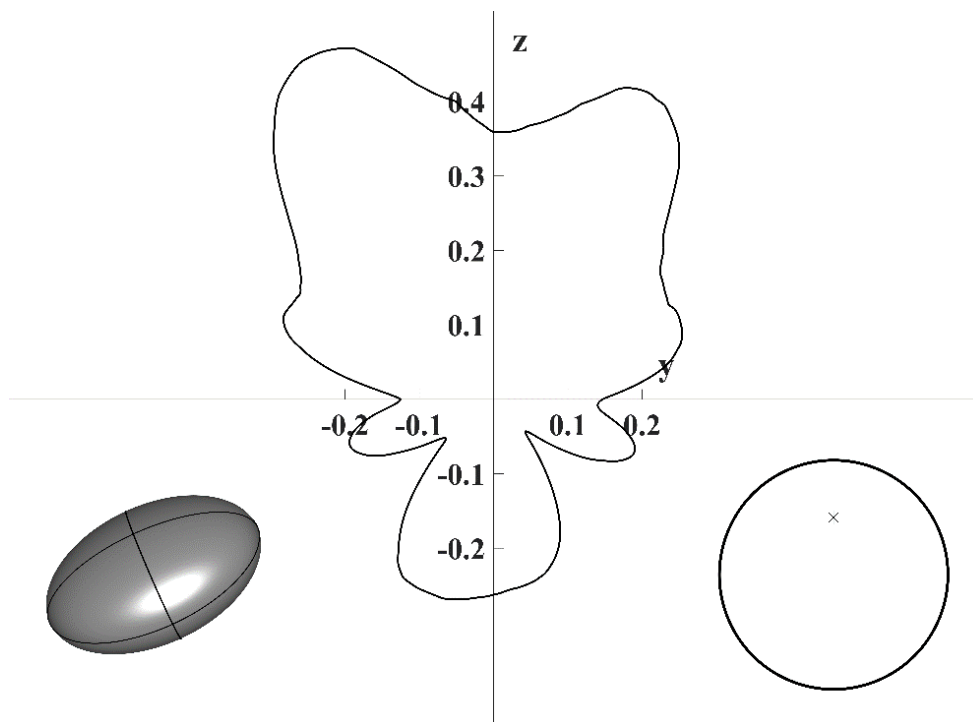


а) а. ж. б. с. для Ω_0



б) и. б. с. для Ω_0

Рис. 6. Диаграммы $|\Psi_S|$ для цилиндрической звуковой волны в случае $w(q) = w_2(q) \equiv 1$ для E



а) а. ж. б. с. для Ω_0

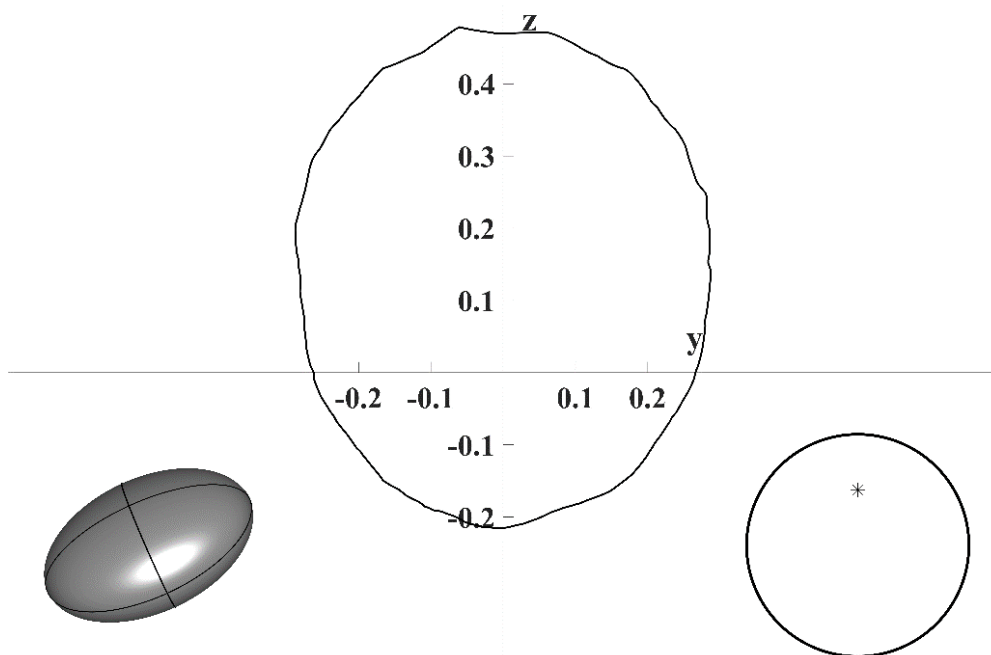

 б) и б. с. для Ω_0

 Рис. 7. Диаграммы $|\Psi_S|$ для сферической звуковой волны в случае $w(q) = w_1(q) \equiv 1$ для E

Рис. 5 – 7 наглядно показывают, как характер боковых стенок цилиндрического волновода T и закон изменения параметров материала внешнего неоднородного слоя упругого препятствия E изменяют вид диаграммы рассеяния. Данный факт особенно заметен на рис. 5.б, 6.б и 7.б, где при смене конфигурации боковых стенок в области Ω_0 с абсолютно жестких на импедансные форма кривой $|\Psi_S|$ становится более выпуклой для большинства $\varphi \in [0, 2\pi]$.

Заключение

Представленное решение показывает эффективность использования метода конечных элементов для решения задач о рассеянии звука при достаточно сложных конфигурациях упругих рассеивающих объектов. Он позволяет представить решение неким однотипным алгоритмом, который сохраняет свою структуру при широком диапазоне изменения параметров задачи.

Полученные результаты показывают, что при рассмотренной частоте звука физические параметры задачи (тип боковых стенок цилиндрического волновода и функция неоднородности внешнего слоя упругого препятствия) оказывают значительное влияние на характер рассеянного поля. Следует ожидать, что повышение частоты падающей волны приведет к более выраженным изменениям диаграммы рассеяния при варьировании упомянутых физических свойств.

В перспективе планируется применение изложенного алгоритма для решения дифракционных задач подобных конфигурации,

учитывая при этом теплопроводящие свойства рассеивающего тела и жидкости.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект 18-11-00199).

Литература

1. Flax, L. Analysis and computation of the acoustic scattering by an elastic prolate spheroid obtained from the T-matrix formulation / L. Flax, L. Dragonette, V. K. Varadan, V. V. Varadan // J. Acoust. Soc. Amer. – 1982. – V. 71. – № 5. – P. 1077-1082.
2. Клещев, А. А. Трехмерные и двумерные (осесимметричные) характеристики упругих сфероидальных рассеивателей / А. А. Клещев // Акуст. журн. – 1986. – Т. 32. – Вып. 2. – С. 268-271.
3. Hackman, R. H. A reanalysis of the acoustic scattering from elastic spheroids / R. H. Hackman, G. S. Sammelmann, K. L. Williams, D. H. Trivett // J. Acoust. Soc. Amer. – 1988. – V. 83. – № 4. – P. 1255-1266.
4. Рождественский, К. Н. О рассеянии звуковых волн на упругом сфероиде / К. Н. Рождественский, Л. А. Толоконников // Акуст. журн. – 1990. – Т. 36. – Вып. 5. – С. 927-930.
5. Толоконников, Л. А. Дифракция звуковых волн на упругом сфероиде с малым эксцентриситетом в вязкой среде / Л. А. Толоконников // Известия Тульского государственного университета. Сер. Математика. Механика. Информатика. – 1997. – Т. 3. – Вып. 1. – С. 152-157.
6. Клещев, А.А. Резонансное рассеяние звука на упругих сфероидальных телах и оболочках / А. А. Клещев // Акуст. журн. – 2014. – Т. 60. – № 3. – С. 253-261.

7. Толоконников, Л. А. Дифракция плоской звуковой волны на неоднородном упругом сфероиде / Л. А. Толоконников, А. В. Лобанов // Известия Тульского государственного университета. Естественные науки. – 2011. – Вып. 2. – С. 176-191.
8. Толоконников, Л. А. Рассеяние наклонно падающей плоской звуковой волны упругим цилиндром с неоднородным покрытием / Л. А. Толоконников // Известия Тульского государственного университета. Естественные науки. – 2013. – Вып. 2. – Ч. 2. – С. 265-274.
9. Толоконников, Л. А. Дифракция цилиндрических звуковых волн на цилиндре с неоднородным упругим покрытием / Л. А. Толоконников // Известия Тульского государственного университета. Естественные науки. – 2013. – Вып. 3. – С. 202-208.
10. Иванов, В. И. Влияние неоднородного покрытия на прохождение звука через упругую оболочку / В. И. Иванов, С. А. Скобельцын // Известия Тульского государственного университета. Естественные науки. – 2013. – Вып. 3. – С. 179-192.
11. Толоконников, Л. А. Рассеяние плоской звуковой волны упругим шаром с неоднородным покрытием / Л. А. Толоконников // Прикладная математика и механика. – 2014. – Т. 78. – Вып. 4. – С. 519-526.
12. Толоконников, Л. А. Дифракция сферической звуковой волны на упругом шаре с неоднородным покрытием / Л. А. Толоконников, Г. А. Родионова // Известия Тульского государственного университета. Естественные науки. – 2014. – Вып. 3. – С. 131-137.
13. Толоконников, Л. А. Дифракция плоской звуковой волны на упругом шаре с неоднородным покрытием и произвольно расположенной сферической полостью / Л. А. Толоконников // Известия Тульского государственного университета. Естественные науки. – 2014. – Вып. 2. – С. 181-193.
14. Скобельцын, С. А. О дифракции звука на упругом сфероиде с непрерывно-неоднородным покрытием / С. А. Скобельцын, Л. А. Толоконников // Современные проблемы математики, механики, информатики: матер. междунар. науч. конф. – Тула : ТулГУ, 2013. – С. 457-464.
15. Harari, I. Finite element method for the Helmholtz equation in an exterior domain: model problems / I. Harari, T. J. R. Hughes // *Comp. Methods Appl. Mech. Eng.* – 1991. – V. 87. – P. 59-96.
16. Gan, H. Finite element formulation of acoustic scattering phenomena with absorbing boundary condition in the frequency domain / H. Gan, P. L. Levin, R. Ludwig // *J. Acoust. Soc. Am.* – 1993. – V. 94. – № 3 – Pt. 1 – P. 1651-1662.
17. Ihlenburg, F. Finite element analysis of acoustic scattering / F. Ihlenburg. – New York : Springer Publishing Company Inc., 2013. – 226 p.
18. Исакович, М. А. Общая акустика / М. А. Исакович. – М. : Наука, 1973. – 496 с.
19. Новацкий, В. Теория упругости. / В. Новацкий – М. : Мир, 1975. – 872 с.
20. Скобельцын, С. А. Решение задач акустики с использованием метода конечных элементов: монография. / С. А. Скобельцын. – Тула : ТулГУ, 2018. – 224 с.
21. *Acoustics Module User's Guide* / Stockholm : COMSOL AB, 2018. – 698 p.
22. *MATLAB Programming Fundamentals* / MA. : The MathWorks, Inc., 2018. – 1418 p.
23. *LiveLink for MATLAB User's Guide* / Stockholm : COMSOL AB, 2018. – 352 p.

#11 (51), 2019 część 4
Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe
(Warszawa, Polska)
Czasopismo jest zarejestrowane i publikowane w Polsce. W czasopiśmie publikowane są artykuły ze wszystkich dziedzin naukowych. Czasopismo publikowane jest w języku polskim, angielskim, niemieckim i rosyjskim.

Artykuły przyjmowane są do dnia 30 każdego miesiąca.

Częstotliwość: 12 wydań rocznie.

Format - A4, kolorowy druk

Wszystkie artykuły są recenzowane

Każdy autor otrzymuje jeden bezpłatny egzemplarz czasopisma.

Bezpłatny dostęp do wersji elektronicznej czasopisma.

Zespół redakcyjny

Redaktor naczelny - Adam Barczuk

Mikołaj Wiśniewski

Szymon Andrzejewski

Dominik Makowski

Paweł Lewandowski

Rada naukowa

Adam Nowicki (Uniwersytet Warszawski)

Michał Adamczyk (Instytut Stosunków Międzynarodowych)

Peter Cohan (Princeton University)

Mateusz Jabłoński (Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki)

Piotr Michalak (Uniwersytet Warszawski)

Jerzy Czarnecki (Uniwersytet Jagielloński)

Kolub Frennen (University of Tübingen)

Bartosz Wysocki (Instytut Stosunków Międzynarodowych)

Patrick O'Connell (Paris IV Sorbonne)

Maciej Kaczmarczyk (Uniwersytet Warszawski)

Dawid Kowalik (Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki)

Peter Clarkwood (University College London)

#11 (51), 2019 part 4
East European Scientific Journal
(Warsaw, Poland)
The journal is registered and published in Poland. The journal is registered and published in Poland. Articles in all spheres of sciences are published in the journal. Journal is published in **English, German, Polish and Russian.**

Articles are accepted till the 30th day of each month.

Periodicity: 12 issues per year.

Format - A4, color printing

All articles are reviewed

Each author receives one free printed copy of the journal

Free access to the electronic version of journal

Editorial

Editor in chief - Adam Barczuk

Mikołaj Wiśniewski

Szymon Andrzejewski

Dominik Makowski

Paweł Lewandowski

The scientific council

Adam Nowicki (Uniwersytet Warszawski)

Michał Adamczyk (Instytut Stosunków Międzynarodowych)

Peter Cohan (Princeton University)

Mateusz Jabłoński (Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki)

Piotr Michalak (Uniwersytet Warszawski)

Jerzy Czarnecki (Uniwersytet Jagielloński)

Kolub Frennen (University of Tübingen)

Bartosz Wysocki (Instytut Stosunków Międzynarodowych)

Patrick O'Connell (Paris IV Sorbonne)

Maciej Kaczmarczyk (Uniwersytet Warszawski)

Dawid Kowalik (Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki)

Peter Clarkwood (University College London)

Igor Dzedzic (Polska Akademia Nauk)
Alexander Klimek (Polska Akademia Nauk)
Alexander Rogowski (Uniwersytet Jagielloński)
Kehan Schreiner(Hebrew University)
Bartosz Mazurkiewicz (Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki)
Anthony Maverick(Bar-Ilan University)
Mikołaj Żukowski (Uniwersytet Warszawski)
Mateusz Marszałek (Uniwersytet Jagielloński)
Szymon Matysiak (Polska Akademia Nauk)
Michał Niewiadomski (Instytut Stosunków Międzynarodowych)
Redaktor naczelny - Adam Barczuk

1000 kopii.

Wydrukowano w «Aleje Jerozolimskie 85/21, 02-001 Warszawa, Polska»

Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe

Aleje Jerozolimskie 85/21, 02-001
Warszawa, Polska

E-mail: info@eesa-journal.com ,

<http://eesa-journal.com/>

Igor Dzedzic (Polska Akademia Nauk)
Alexander Klimek (Polska Akademia Nauk)
Alexander Rogowski (Uniwersytet Jagielloński)
Kehan Schreiner(Hebrew University)
Bartosz Mazurkiewicz (Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki)
Anthony Maverick(Bar-Ilan University)
Mikołaj Żukowski (Uniwersytet Warszawski)
Mateusz Marszałek (Uniwersytet Jagielloński)
Szymon Matysiak (Polska Akademia Nauk)
Michał Niewiadomski (Instytut Stosunków Międzynarodowych)
Editor in chief - Adam Barczuk

1000 copies.

Printed in the "Jerozolimskie 85/21, 02-001 Warsaw, Poland»

East European Scientific Journal

Jerozolimskie 85/21, 02-001 Warsaw,
Poland

E-mail: info@eesa-journal.com ,

<http://eesa-journal.com>