

ISSN 1813-5420

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

ЕНЕРГЕТИКА

економіка, технології, екологія



Науковий журнал

№2–2018

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

ЕНЕРГЕТИКА

економіка, технології, екологія

Науковий журнал

№ 2 (52) - 2018

Виходить 4 рази на рік
Заснований у березні 2000 року

Енергетика сталого розвитку
Smart Grid системи та технології
Лібералізовані ринки енергії
Технології та обладнання в енергетиці
Енергетичний менеджмент та аудит
Енергетичні системи та комплекси
Екологічні проблеми в енергетиці

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2018

Головний редактор – Ю.І. Якименко

Заступники

головного редактора – С.П. Денисюк, О.С. Яндульський, Є.М. Письменний

Відповідальний секретар – О.О. Закладний

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ: А.О. Авраменко, Б.І. Басок, О.Ф. Буткевич, О.О. Вовк,
(Україна) А.В. Волошко, Г.О. Воропаєв, В.І. Дешко, В.Я. Жуйков,
С.О. Кудря, А.В. Носовський, М.Я. Островерхов,
С.М. Пересада, В.А. Попов, К.К. Ткачук, В.О. Туз,
О.Ю. Черноусенко, С.П. Шевчук, В.Ф. Шинкаренко

ЗАКОРДОННІ ЧЛЕНИ

РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ: Е. Хандшин (*Дортмундський технічний університет, інститут енергетичних систем та економіки енергетики, Німеччина*), Ричард Стржелецкі (*Інститут електротехніки, Варшава, Польща*), П.Я. Екель (*Папський католицький університет Мінас Жерайс, Бразилія*), А.В. Кузнецов (*Університет штату Північна Кароліна, США*), В.І. Олещук (*Інститут енергетики Академії Наук Молдови*), О.В. Кузнецов (*Університет прикладних наук, Німеччина*), Карлос Ф. Пфайфер (*Університетський коледж Південно-Східної Норвегії*), А. Башкіс (*Вільнюський технічний університет ім. Гедимінаса, Литва*), Опітс Йоахім (*Інститут енергетики м. Хамм, Німеччина*), В.М. Постолатий (*Інститут енергетики Академії Наук Молдови*), Рошан Шарма (*Університет Південно-Східної Норвегії*).

Технічний секретар Н.О. Кравчук.

Веб-сайт журналу <http://energy.kpi.ua>

Журнал зареєстровано Реєстраційний номер Свідоцтва про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації КВ №22857-12775ПР від 14.06.2017 р.

Журнал внесено до Переліку фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук відповідно до рішення Атестаційної колегії МОН України від 13 грудня 2016 р., затверджене наказом МОН України № 1604 від 22 грудня 2016 р. Журнал включено до баз даних «Наукова періодика України» НБУВ, Google Scholar, Index Copernicus, WorldCat, BASE, OpenAIRE, PИHЦ, Джерело, URAN, Open Academic Journal Index (OAJI), Polska Bibliografia Naukowa, Research Bible, International Institute of Organized Research (I2OR), Academic Keys, General Impact Factor, Directory of Research Journals Indexing (DRJI), Scientific Indexing Services, Cosmos Impact Factor, Infobase Index, Real Time Impact Factor, електронного архіву наукових матеріалів ELAKPI. Підписано до друку за рекомендацією Вченої ради Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (протокол № 9 від 1 жовтня 2018 р.).

Коректор В.Г. Смоляр. Комп'ютерна верстка М.В. Артем'єв.

Відповідальний за випуск видання Н.О.Кравчук.

ISSN 1813-5420 (Print), 2308-7382 (Online).

Адреса редакції 03056, Україна, м.Київ, вул.Борщагівська, 115, к.315,
тел. (38-044) 406-85-14, e-mail: kravkpi@ukr.net

Видавець КПІ ім. Ігоря Сікорського ВПІ ВПК «Політехніка»,
м.Київ, вул. Політехнічна, 14, корп. 15.

Увага! Передрукування матеріалів іншими виданнями можливе лише з дозволу редакційної колегії журналу **ЕНЕРГЕТИКА: економіка, технології, екологія**

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018

NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF UKRAINE
“IGOR SIKORSKY KYIV POLYTECHNIC INSTITUTE”

POWER ENGINEERING

economics, technique, ecology

ENERHETYKA:
ekonomika, tekhnolohiyi, ekolohiya

The Scientific Journal

№ 2 (52) – 2018

Published 4 issues per year

Founded in March 2000

Sustainable energy
Smart Grid system of ta technologies
Liberalized energy market
Energy technologies and equipment
Energy management and audit
Energy systems and complexes
Environmental problems in energy

Kyiv

Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

2018

Editor-in-chief Yu.I. Yakymenko

Deputy editors-in-chief S.P. Denysiuk, O.S. Yandulskyi, E.M. Pysmennyi

Deputy O.O. Zakladnyi

EDITORIAL BOARD: (Ukraine) A.O. Avramenko, B.I. Basok, O.F. Butkevych, O.O. Vovk, A.V. Voloshko, G. Voropaiev, V.I. Deshko, V.Ya. Zhuykov, S.O. Kudrya, A.V. Nosovsky, M.Ya. Ostroverkhov, S.M. Peresada, V.A. Popov, K.K. Tkachuk, V.O. Tuz, O. Yu. Chernousenko, S.P. Shevchuk, V.F. Shinkarenko

FOREIGN MEMBERS OF EDITORIAL BOARD: E. Handschin (*Institute of Power Systems and Power Economics of Dortmund Technical University, Germany*), Richard Strzelecki (*Electro technical Institute, Warsaw, Poland*), P.Y. Ekel (*Pontifical Catholic University of Minas Gerais, Belo Horizonte, Brazil*), A.V. Kuznetsov (*North Caroline State University, USA*), V. Oleschuk (*Institute of Power Engineering of the Academy of Sciences of Moldova*), O. Kuznetsov (*University of Applied sciences, Germany*), Carlos F. Pfeiffer (*University College of Southeast Norway*), A. Baskys (*Vilnius Gediminas Technical University, Vilnius, Lithuania*), Opitz H. Joachim (*EIH Energy Institute Hamm, Germany*), V. Postolati (*Institute of Power Engineering of the Academy of Sciences of Moldova*), Roshan Sharma (*University of South-Eastern Norway*).

Technical secretary N.O. Kravchuk

Website of the journal <http://energy.kpi.ua>

Journal was registered Certificate of State Registration Printed Media series KB №22857-12775ПП dated 14 June 2017

The Journal was registered by decision Attestation commission MES of Ukraine of December 13, 2016, approved by order of MES of Ukraine № 1604 of December 22, 2016 as an occupational edition. The Journal is included in databases «Scientific Periodicals of Ukraine», Google Scholar, Index Copernicus WorldCat, BASE, OpenAIRE, RSCI, Djerele, URAN, Open Academic Journal Index (OAJI), Polska Bibliografia Naukowa, Research Bible, International Institute of Organized Research (I2OR), Academic Keys, General Impact Factor, Directory of Research Journals Indexing (DRJI), Scientific Indexing Services, Cosmos Impact Factor, Infobase Index, Real Time Impact Factor, electronic archive of research materials ELAKPI. Passed for printing under recommendation of Academic Council of National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (protocol № 9 on October 1, 2018).

Proofreading V.G. Smoliar. Desktop publishing M. Artemiev.
Responsible for the publication N.O. Kravchuk.

ISSN 1813-5420 (Print), 2308-7382 (Online).

Address of editorial office 03056, Ukraine, Kyiv, 115 Borschagivska str., office 315
tel. (38-044) 406-85-14, e-mail: kravkpi@ukr.net

The publisher Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute IPP PPC "Politehnika", Kyiv, 14 Polytechnique str., b. 15.

Attention! Reprint material in other publications only with the permission of editorial board of the journal **POWER ENGINEERING: Economics, Technique, Ecology**

© Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2018

ЗМІСТ

ЕНЕРГЕТИКА СТАЛОГО РОЗВИТКУ

С.П. Денисюк, Г.Г. Стрелкова, К.Ф. Пфайфер, М.Т. Стрелков, О.С. Іщенко. Європейські тенденції інноваційного розвитку в енергетичному секторі та сферах кінцевого енергоспоживання . 7

SMART GRID СИСТЕМИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ

О.В. Коцар. Smart-системи вимірювання, обліку та управління енерговикористанням 20

ЛІБЕРАЛІЗОВАНІ РИНКИ ЕНЕРГІЇ

В.І. Дешко, Д.С. Карпенко. Техніко-економічний аналіз створення ринку теплової енергії в Україні 26

ТЕХНОЛОГІЇ ТА ОБЛАДНАННЯ В ЕНЕРГЕТИЦІ

В.І. Філатов, О.Ю. Тишко. Сумісне спалювання біомаси та антрациту в паровому котлі блоку 300 МВт 38

А.А. Редько, А.А. Павловская, А.В. Давиденко, Н.В. Куликова, И.А. Редько. Влияние характеристик вихревого горелочного устройства на эффективность теплообмена в топке парового котла..... 44

С.А. Рева, А. М. Терех, В.А. Рогачев, А.И. Руденко. Оценка теплоаэродинамической эффективности пакетов винтообразных труб 51

Д.Т. Юсупов. Влияние различных видов примесей на электрическую прочность трансформаторного масла и способы их удаления 58

Є.А. Бондаренко, Т.В. Андрієнко, Д.С. Кушнір. Оцінювання професійних ризиків електротравматизму для персоналу електричних станцій та систем 63

В.В. Кучанський. Заходи обмеження аперіодичної складової струму при комутаціях ліній електропередачі надвисокої напруги 750 кВ..... 69

Б.І. Басок, А.В. Тимошенко, Н.С. Корбут. Исследование процесса конвективного теплообмена в слое твердого дисперсного материала из горных пород магматического происхождения 76

О.О. Баскова, Г.О. Воропаєв. Влияние геометрии гофрированной поверхности на структуру течения и интенсивность теплообмена в трубе 85

ЕНЕРГЕТИЧНИЙ МЕНЕДЖМЕНТ ТА АУДИТ

А.А. Маліновський, В.Г. Турковський, К.Б. Покровський, А.З. Музичак. Програмна та алгоритмічна підтримка енергетичного аудиту будівель та їх енергетичної сертифікації..... 96

В.П. Розен, Л.В. Давиденко, Н.В. Давиденко. Урахування циклічних змін процесу водоподачі під час контролю ефективності електроспоживання насосних станцій..... 103

ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

Д.В. Філянін Визначення джерел гармонічних спотворень в системах електропостачання з використанням алгоритму дискретного перетворення ФУР'С за періодами..... 110

ЕКОЛОГІЧНІ ПРОБЛЕМИ В ЕНЕРГЕТИЦІ

І.Л. Трофімов, С.В. Бойченко, О.М. Тихенко, І.О. Шкільнюк. Оцінка фітотоксичності сумішевих авіаційних палив із застосуванням рослинних тестерів 120

І.О. Рабош, О.В. Кофанова, А.В. Підгорний. Вивчення забруднення урбаноземів об'єктами автотранспортного комплексу 133

Вимоги до оформлення статей..... 143

CONTENTS

SUSTAINABLE ENERGY

- S. Denysiuk, H. Strelkova, C. Pfeiffer, M. Strelkov, O. Ishchenko.** European tendencies of innovative development for energy sector and final energy consumption..... 7

SMART GRID SYSTEM AND TECHNOLOGY

- O. Kotsar.** Smart systems for measuring, metering and energy management 20

LIBERALIZED ENERGY MARKET

- V. Deshko, D. Karpenko.** Technical-economic analysis of the creation of the thermal energy market in Ukraine 26

ENERGY TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT

- V. Filatov, O. Tyshko.** Combined combustion of biomass and antracite in the steam boiler of unit 300MW 38

- A. Redko, A. Pavlovskay, A. Davidenko, N. Kulikova, I. Redko.** Influence of characteristics vortex burner for heat transfer efficiency in the furnace boiler..... 44

- S. Reva, A. Terekh, V. Rogachov, A. Rudenko.** Estimation of heataerodynamic efficiency of screwing tube bundles 51

- D. Yusupov.** Influence of various impurities on electric strength of transformer oil and method of removal 58

- E. Bondarenko, T. Andrienko, D. Kushnir.** Evaluation of professional risks of electrotravmatism for personnel of electrical stations and systems 63

- V. Kuchanskyy.** The measures for suppression aperiodic current component in extra-high voltage lines 750 kV 69

- B. Basok, A. Timoshenko.** Investigation of the process of convective heat exchange in the layer of solid disperse material from mountain rocks of magmatic origin 76

- O. Baskova, G. Voropaiev.** Influence of geometry of corrugated surface on the structure of current and intensity of heat transfer in a pipe..... 85

ENERGY MANAGEMENT AND AUDIT

- A. Malinowski, V. Turkovski, K. Pokrovskiy, A. Muzychak.** Software and algorithmic support for energy audit of buildings and for their energy certification..... 96

- V. Rozen, L. Davydenko, N. Davydenko.** Taking into consideration of cyclic changes in the water supply process during control of the power consumption efficiency of pumping stations..... 103

ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES

- D. Filyanin.** Identification of harmonic distortion sources in distribution systems using the discrete Fourier transform on periods 110

ENVIRONMENTAL PROBLEMS IN ENERGY

- I. Trofimov, S.Boichenko, O.Tykhenko, I. Shkilniuk.** Estimation of fitotoxicity of mixed aviation fuel with application of plant testers 120

- I. Rabosh, O. Kofanova, A. Pidgornuyy.** Study of urban seal pollution by a motor transport complex 133

ЕНЕРГЕТИКА СТАЛОГО РОЗВИТКУ SUSTAINABLE ENERGY

УДК 620.91+ 621.31

С.П. Денисюк, д-р техн. наук, професор; ORCID 0000-0002-6299-368
Г.Г. Стрелкова, канд. фіз.-мат наук, доцент; ORCID 0000-0002-5708-1134
К.Ф. Пфайфер, д-р техн. наук, професор; ORCID 0000-0002-2265-6495
М.Т. Стрелков, канд. техн. наук, доцент; ORCID 0000-0002-4320-7162
О.С. Іщенко, магістр; ORCID 0000-0003-3315-4842
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Університет Південно-Східної Норвегії

ЄВРОПЕЙСЬКІ ТЕНДЕНЦІЇ ІННОВАЦІЙНОГО РОЗВИТКУ В ЕНЕРГЕТИЧНОМУ СЕКТОРІ ТА СФЕРАХ КІНЦЕВОГО ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ¹

В роботі проведено системне дослідження змін, що відбулися останніми роками в енергетичній політиці ЄС та політиці з інноваційної діяльності в енергетиці, з метою визначення тенденцій і пріоритетів ЄС. Надано характеристику сучасних тенденцій, цілей, основних завдань та напрямів інноваційного розвитку в енергетичному секторі та сферах кінцевого енергоспоживання ЄС. Побудовано інформаційну модель з динаміки формування політичних і стратегічних чинників, що закладають напрями інноваційного розвитку в енергетиці ЄС. Розглянуто специфіку інноваційних процесів, пов'язаних з функціонуванням енергетичного бізнесу, енергетичних ринків і ринків енергоефективних технологій, та пріоритети інноваційного розвитку за напрямками виробництва, передачі, розподілу та споживання енергії. Зазначено важливість переходу в енергетичному секторі до сервіс-орієнтованих бізнес-моделей, які є більш ринковими в умовах трансформації енергетичної галузі та енергетичних ринків. Наведено тенденції змін у європейському енергетичному регуляторному середовищі, що відбулися внаслідок розвитку та посилення комерціалізації інновацій в умовах енергетичного переходу та змін у європейському енергетичному ландшафті. Надано характеристику стратегічних пріоритетів та умов, необхідних для зміцнення інноваційного розвитку і поширення енергетичних інновацій в Україні у довгостроковій перспективі.

Ключові слова: енергетичний сектор, інновації в енергетиці, енергетичне законодавство, енергопостачання, кінцеве енергоспоживання, енергоефективність, енергетичні ринки, регулювання.

Вступ

Зміна технологічних укладів, яка зараз відбувається в Україні, ставить нові завдання перед вітчизняним енергетичним сектором та промисловістю. Енергетичний сектор потребує проведення широкого спектру заходів щодо модернізації об'єктів інфраструктури паливно-енергетичного комплексу, поширення інформаційно-комунікаційних технологій, впровадження інтелектуальних мереж. Одночасно з цим має підвищуватися ефективність енерговикористання, впроваджуватися чисті безпечні технології та процеси, зростати частка використання відновлюваних джерел енергії.

Необхідність переходу до більш сталого виробництва у напрямку низьковуглецевої економіки та створення конкурентоспроможного виробництва потребує значних інноваційних перетворень як в енергетиці, так і у сфері кінцевого енергоспоживання. Енергетичні технології матимуть вирішальне значення для декарбонізації економіки, забезпечення сталого енергопостачання та зростання конкурентоспроможності виробництва. Підвищення енергоефективності, збільшення частки відновлюваних джерел енергії, впровадження низьковуглецевих енерготехнологій та технологій чистого виробництва потребують відповідних механізмів та інструментів з підтримки інноваційних процесів.

¹ Роботу виконано в рамках міжнародного освітнього проекту «Норвезько – Українське співробітництво з освіти, засноване на наукових дослідженнях в сфері інноваційних, сталих та енергоефективних систем» («Norwegian – Ukrainian Cooperation on Research Based Education in Innovative Sustainable and Energy Efficient Systems» ID: CPEA-LT-2016/10044)

Аналіз досліджень і публікацій щодо інноваційного розвитку в енергетиці, постановка проблеми

Однієї з найважливіших цілей сталого розвитку є забезпечення всезагального доступу до прийняттого для споживача за ціною, надійного і сталого енергопостачання та сучасних джерел енергії. Для досягнення сталості в енергетичній сфері та сфері кінцевого енергоспоживання важливим є посилення інноваційного розвитку і поширення інновацій. Аналіз правового підґрунтя інноваційного розвитку в енергетичному секторі та сферах кінцевого споживання ЄС проводився на підставі програмних документів та наукових досліджень в цій сфері. Складові енергетичної політики ЄС та особливості її реалізації в сфері енергоефективності, питання дослідно-інноваційної діяльності за напрямом енергоефективності попередньо розглядалися у роботі [1], де, зокрема, було проаналізовано стратегічні пріоритети, сфери та напрями досліджень та інновацій ЄС в рамках Інтегрованого Стратегічного плану енергетичних технологій. Однак значні зміни, що відбуваються останнім часом в енергетичному ландшафті ЄС, розвиток нових технологій та посилення комерціалізації інновацій, що стосуються енергетичного сектору і сфери кінцевого споживання енергії, потребують проведення подальших досліджень з вивчення європейського досвіду за напрямом інноваційного розвитку в енергетиці.

Метою аналізу програмних документів за напрямом інноваційного розвитку в енергетиці було визначення основних засад політики інноваційного розвитку ЄС в енергетичному секторі та сферах кінцевого споживання ЄС.

Про важливість інновацій в енергетиці зазначається у Резолюції "Перетворення нашого світу: Порядок денний в галузі сталого розвитку на період до 2030 року" [2], яка 25 вересня 2015 року була прийнята Генеральною Асамблеєю ООН, а з 1 січня 2016 року набрала чинності. Резолюцією визначається, що на період до 2030 року перед світовим суспільством стоять амбітні цілі та завдання, щоб досягти суттєвого збільшення у світовому енергетичному балансі енергії, виробленої з відновлюваних джерел та збільшити у два рази глобальний показник підвищення енергоефективності. Таким чином, впровадження наступних п'ятнадцяти років пріоритети глобальної стратегії сталого розвитку будуть спрямовувати енергетичні політики всіх країн світу і стимулювати відповідні дії в енергетичній сфері. У європейському просторі вирішальне значення інноваційного розвитку закріплено оновленою кліматичною та енергетичною політикою ЄС та стратегією для сталого енергетичного союзу. Впровадження інноваційних технологій має сприяти декарбонізації європейської економіки, підвищенню конкурентоспроможності, трансформації енергетичної системи ЄС, зростанню енергетичної ефективності сфер кінцевого енергоспоживання, забезпечення сучасного сталого енергопостачання.

На сьогодні в ЄС існує значний спектр правових документів, які пов'язані з інноваційним розвитком в енергетиці у широкому часовому горизонті 2020-2030-2050 рр. Втім останні роки характеризувались значними змінами у світовому і європейському енергетичних ландшафтах, зростанням необхідності розгортання більш інтенсивних дій з розбудови низьковуглецевої економіки, підвищення конкурентоспроможності і гарантування безпеки енергопостачання. Це призвело до змін у політиці та стратегії ЄС, що в свою чергу позначилось на пріоритетах інноваційного розвитку в енергетиці. Внаслідок цього відбулись як внесення змін у попередні правові акти, так і створення низки нових політичних та стратегічних документів: Повідомлення Комісії для Європейського Парламенту, Ради, Європейського соціально-економічного комітету та Комітету регіонів від 02.05.2013 «Енергетичні технології та інновації», COM (2013) 253 [3]; Повідомлення Комісії для Європейського Парламенту, Ради, Європейського соціально-економічного комітету та Комітету регіонів від 22.01.2014 «Рамкова основа для кліматичної та енергетичної політики на період з 2020 до 2030 рр.», COM (2014) 15 [4]; Повідомлення Комісії для Європейського Парламенту та Ради від 28.05.2014 «Європейська стратегія енергетичної безпеки», COM (2014) 330 [5]; Повідомлення Комісії для Європейського Парламенту та Ради від 23.07.2014 «Енергоефективність та її внесок у забезпечення енергетичної безпеки», COM (2014) 520 [6]; Повідомлення Комісії для Європейського Парламенту, Ради, Європейського соціально-економічного комітету, Комітету регіонів та Європейського інвестиційного банку від 25.02.2015 «Рамкова стратегія для стійкого енергетичного союзу з довгостроковою політикою щодо зміни клімату», COM(2015) 80 [7]; Повідомлення Комісії від 15.09.2015 «Щодо Інтегрованого стратегічного плану енергетичних технологій: прискорення трансформації Європейської енергетичної системи», COM (2015) 6317 [8]; Висновок Європейського економічного і соціального комітету з «Повідомлення Комісії - Щодо Інтегрованого стратегічного плану енергетичних технологій: прискорення трансформації Європейської енергетичної системи» від 17.02.2016 C(2015) 6317 [9]; Повідомлення Комісії для Європейського Парламенту та Ради від 02.03.2016 «Оцінка наслідків Паризької угоди та супроводжуюча пропозиція з рішення Ради про підписання від імені Європейського союзу Паризької угоди, прийнятої відповідно до Рамкової конвенції Організації Об'єднаних Націй про зміну клімату», COM (2016) 110 [10].

Стратегічні пріоритети з досліджень та інновацій, що сприятимуть трансформації енергетичної системи ЄС, створенню нових робочих місць та економічному зростанню, за даними [10] наведено у систематизованому вигляді на структурно-логічній схемі (рис.1). До переваг Інтегрованого стратегічного

плану енергетичних технологій слід віднести те, що на передній план висувається більш цільовий фокус для десяти напрямів дій, структурованих навколо науково-дослідних та інноваційних пріоритетів Стратегії енергетичного союзу. Як можна побачити з наведеної схеми, планом визначено шість сфер дій та десять пріоритетних напрямів за ними. Перша сфера сфокусована на впровадженні амбітної мети щодо топ-лідерства ЄС в галузі відновлюваних джерел енергії, і визначає два напрями: підтримку технологічного лідерства шляхом розробки високопродуктивних технологій використання відновлюваних джерел енергії і їх інтеграції в енергетичну систему ЄС та зниження вартості ключових технологій. Для другої сфери, що пов'язана зі створенням майбутньої SMART-енергетичної системи ЄС, центром якої є споживач, проведення досліджень та інновацій зосереджується за двома напрямами: перший з них включає створення технологій і послуг для SMART-будинків для забезпечення інтелектуальних рішень для споживачів енергії, а другий - підвищення стійкості, безпеки і SMART-рівня енергосистеми. Третя сфера – розвиток і посилення енергоефективних систем - включає дослідження та інновації за напрямом розробки нових матеріалів і технологій з енергоефективних рішень для будівель і інструментів для їх поглинання на ринку та продовження зусиль за напрямом зменшення енергоємності та збільшення конкурентоспроможності промисловості ЄС. Четверта сфера охоплює питання диверсифікації та посилення варіантів енергозабезпечення сталого транспорту, що потребує досягнення конкурентоспроможності в глобальному секторі виробництва батарей для сприяння розвитку електромобільності, а також посилення впровадження на ринок відновлюваних видів палива для сталих рішень на транспорті. Діяльність в рамках цих двох напрямків координуватиметься із розвитком Стратегічної програми досліджень і інновацій на транспорті. П'ята сфера пов'язана з посиленням дій у розгортанні технологій з уловлювання, зберігання і використання вуглецю і зосереджує активізацію дослідницької та інноваційної діяльності за напрямом, що поєднує питання застосування технологій з уловлювання і зберігання вуглецю (CCS) із посиленням комерційної життєздатності технологій уловлювання і використання вуглецю (CCU). За шостою сферою, яка присвячена безпеці використання атомної енергії та діям для її підвищення, будуть підтримуватися наукові дослідження та інноваційні рішення за напрямом покращення рівня безпеки ядерних реакторів і паливних циклів в процесі експлуатації та виведення з експлуатації, а також підвищення їх ефективності. Також до цієї сфери відноситься підтримка фундаментальних досліджень термоядерного синтезу (ITER).

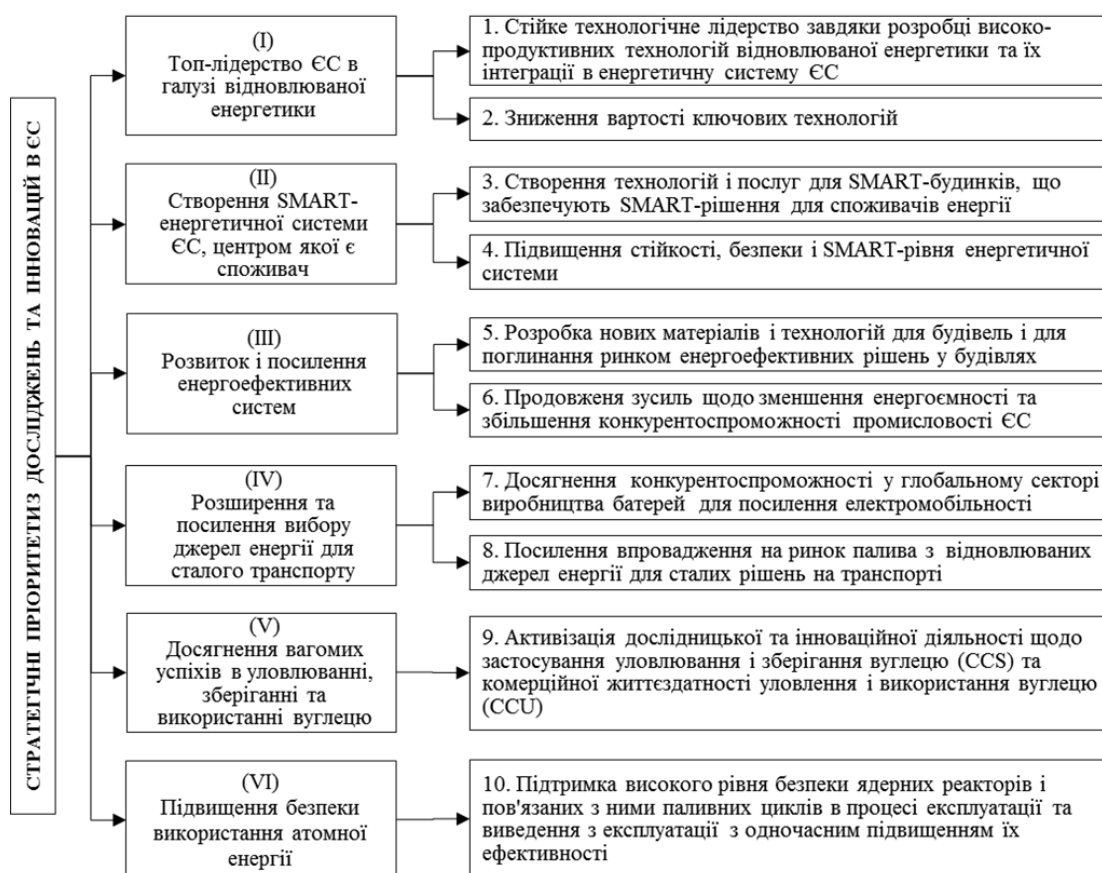


Рисунок 1 – Структурно-логічна схема пріоритетних сфер та напрямів з досліджень та інновацій в ЄС (складено на підставі COM (2015) 6317 [8])

Дослідження та інновації за даними сферами та напрямками мають слугувати розвитку та інтеграції інноваційних технологій та системних рішень, прискоренню трансформації Європейської енергетичної системи, і реалізації мети ЄС щодо світового лідерства в області розгортання і використання відновлювальних джерел енергії.

Втім зміни, що відбуваються в енергетичному ландшафті ЄС внаслідок реалізації енергетичного переходу, потребують проведення подальшого аналізу програмних документів та досліджень за напрямом інноваційного розвитку в енергетиці. Зокрема, значна увага має бути надана аналізу змін у регуляторному середовищі, які спостерігаються у країнах ЄС.

Мета та завдання дослідження

Метою роботи є визначення тенденцій і пріоритетів ЄС в інноваційному розвитку енергетики шляхом аналізу динаміки формування відповідних політичних та стратегічних чинників для прискорення інноваційних процесів у національному енергетичному секторі та сферах кінцевого енергоспоживання.

Для реалізації мети були поставлені наступні завдання:

- виявити динаміку формування політичних і стратегічних чинників, що закладають напрями інноваційного розвитку в енергетичному секторі ЄС;
- побудувати інформаційну модель з динаміки формування політичних і стратегічних чинників, що пов'язані з дослідженнями та інноваціями в енергетиці;
- визначити тенденції змін у регуляторному середовищі, які пов'язані з розвитком та посиленням комерціалізації інновацій в умовах енергетичного переходу та змін у європейському енергетичному ландшафті.

Основні матеріали дослідження

Вихідні дані та методи дослідження. Визначення загальної характеристики європейських тенденцій та стратегічних пріоритетів інноваційного розвитку в енергетичному секторі і сферах кінцевого споживання до 2020 р. та у подальшому часовому горизонті до 2030 р. ґрунтувалось на виявленні та аналізі політичних чинників ЄС, що окреслюють найважливіші сфери інноваційного розвитку в енергетиці та формують відповідні напрями змін у регуляторному середовищі.

Для забезпечення всебічного і об'єктивного підходу необхідно було сформувати інформаційний масив даних з правових актів ЄС за функціональною ознакою інноваційного розвитку в енергетиці. Джерелами формування даного інформаційного масиву були матеріали відкритих електронних джерел баз даних права ЄС та інформаційних систем, що створені або підтримуються Європейською Комісією. До головних з них належали бази даних інформаційно-правової системи «Євро-ЛЕКС» (EUR-Lex), матеріали офіційного сайту Європейської Комісії за розділом пріоритетів «Енергетичний союз і клімат» (European Commission. Priorities. Energy Union and Climate). При створенні масиву також використовувались додаткові аналітичні ресурси з інноваційного розвитку в енергетиці, що підтримуються Європейською Комісією, зокрема, ресурси Інформаційної системи стратегічних енергетичних технологій (SETIS), Рамкової програми ЄС з досліджень та інновацій «Горизонт 2020» (Horizon 2020) тощо.

Основними методами дослідження при вирішенні поставлених у роботі завдань були системний підхід, порівняльний аналіз, експлікативні методи (зокрема, інструменти івент- та контент-аналізу) і структурно-функціональний підхід.

Системний підхід застосовувався у ході всього дослідження, зокрема, при побудові інформаційної моделі динаміки формування політичних і стратегічних чинників ЄС, що закладають напрями інноваційного розвитку в енергетичному секторі та сферах кінцевого енергоспоживання.

Аналіз проводився у контексті визначення місця і ролі інновацій у забезпеченні трансформації енергетичної системи ЄС та переходу до низьковуглецевої економіки. Задачі аналізу полягали у виявленні стратегічних, економічних і соціальних чинників впливу на інноваційний розвиток, а також специфіки пріоритетів досліджень та інновацій за напрямками виробництва, передачі, розподілу і споживання енергії у часовому горизонті до 2020 р. і далі до 2030 р.

Експлікативні методи використовувались для вивчення динаміки змін та виявлення відмінностей у правових документах, які відбулись впродовж останніх років, а також для дослідження їх зв'язків і взаємодії зі стратегічними, політичними, економічними, фінансовими та соціальними чинниками впливу.

Для проведення аналізу зі застосуванням експлікативних методів була обрана наступна методика. Відправною часовою точкою івент- та контент-аналізу було обрано 2007 р., оскільки в цьому році був прийнятий перший Стратегічний план енергетичних технологій (SET-Plan). Цей план був головним інструментом реалізації інноваційної політики ЄС щодо пом'якшення наслідків змін клімату і трансформації енергетики й визначав пріоритети інновацій та досліджень на період 2020-2050 рр. Метою плану було зниження вартості низьковуглецевих технологій та прискорення їх поглинання на ринку та сприяння консолідації ресурсів країн ЄС навколо обмеженого числа пріоритетів у сфері досліджень та інновацій в енергетиці. Втім, на думку європейських експертів, реалізація першого SET-Plan сприяла, головним чином, просуванню певних технологій відновлюваної енергетики (зокрема, сонячної, вітрової і

біо-енергетики). Високо оцінюючи всі досягнення від впровадження цього плану, ними відмічається його певна недосконалість у контексті відсутності створення цілісної європейської програми з наукових досліджень та інновацій в енергетиці. Тому для пошуку даних за допомогою інструментів івент- та контент-аналізу були задані часові рамки 2007-2016 рр. Крім цього, для відбору даних були задані наступні додаткові обмеження: до складу інформаційного масиву мають входити лише ті правові акти ЄС, які є чинними станом на 2016 р.; дані правові акти мають силу визначати пріоритети досліджень та інновацій в енергетиці до 2020 р. і у подальшому горизонті до 2030 р.; в цих документах враховані зміни, що відбулись в політиці, економіці та енергетичному ландшафті ЄС з часу прийняття першого SET-Plan.

За допомогою порівняльного аналізу проводилось зіставлення концептуальних засад і основних положень політичних, стратегічних документів ЄС та правових актів, що пов'язані з регулюванням відносин у сфері дослідно-інноваційної діяльності в енергетиці у визначеному інформаційному масиві.

Структурно-функціональний підхід був здійснений при вивченні тенденцій інноваційного розвитку за складовими енергетичної системи ЄС. Застосування даного підходу дозволило врахувати причини, детермінанти та фактори, що впливають на вибір напрямів і пріоритетів інноваційного розвитку.

Динаміка формування політичних і стратегічних чинників, що закладають напрями інноваційного розвитку в енергетичному секторі ЄС. Згідно запропонованої методології дослідження побудова інформаційної моделі, яка б дозволила систематизувати правові акти ЄС та визначити динаміку формування політичних і стратегічних чинників, що пов'язані з дослідженнями та інноваціями в енергетиці, ґрунтувалась на системному підході зі застосуванням експлікативних методів. Для створення необхідної бази даних в ході дослідження проводилась обробка як правових актів ЄС, так і додаткових аналітичних джерел з відкритих інформаційних електронних ресурсів, що підтримуються Європейською Комісією. Завдяки застосуванню інструментів якісного контент-аналізу був отриманий інформаційний масив, що за змістом охоплював правові акти ЄС, які визначають детермінанти і напрями досліджень та інновацій в енергетичному секторі та сферах кінцевого споживання. При проведенні івент-аналізу досліджувалась еволюція та динаміка правового середовища ЄС у контексті інноваційного розвитку в енергетиці впродовж останніх десяти років.

За підсумками івент- та контент-аналізу був створений остаточний інформаційний масив чинників інноваційного розвитку ЄС в енергетичному секторі та сферах кінцевого споживання. До складу цього масиву увійшла наступна низка документів, виданих в ЄС у часових рамках 2013-2016 рр. Створений інформаційний масив політичних і стратегічних чинників ЄС, що формують напрями інноваційного розвитку в енергетиці, дозволив проаналізувати правове підґрунтя ЄС з інноваційного розвитку в енергетиці з метою вивчення сучасних європейських тенденцій у сфері досліджень та інновацій. Визначені взаємопов'язані та взаємодоповнюючі правові акти ЄС закладають на період до 2020 р. та у горизонті 2030 р. засади політики, стратегії, принципів та напрямів дослідно-інноваційної діяльності в енергетиці та сферах кінцевого споживання.

Систематизація бази даних, отриманої за результатами експлікативних методів, дозволила визначити попередні часові рамки і склад правових актів, що стосувались інноваційного розвитку для складових енергетичної системи ЄС. Подальший перехресний аналіз та вивчення взаємозв'язків цих документів показали, що внаслідок еволюції завдань і пріоритетів у політиці та стратегії ЄС для деяких з правових актів закладаються обмеження у строки їх дії. Це дозволило вилучити з попереднього складу документи, які згідно з повідомленнями Єврокомісії мають бути відмінені або зазнати суттєвих змін.

Аналіз правового підґрунтя інноваційного розвитку в енергетичному секторі та сферах кінцевого споживання ЄС показав, що Повідомлення Комісії «Енергетичні технології та інновації» [3] слугувало початком для подальших змін та вдосконалення інноваційної політики ЄС у широкому контексті. Цим документом в 2013 р. були визначені вихідні умови, засади та контури майбутніх змін в енергетичних технологіях та інноваціях, які мають відбутися в ЄС до 2020 р. та у подальшому горизонті для створення одночасно сильної та динамічної стратегії у сфері енергетичних технологій та інновацій. Саме у цьому документі було зазначено, що Стратегічний план енергетичних технологій (SET-Plan), прийнятий Єврокомісією ще у 2007 р. у якості основного інструменту інноваційного розвитку для внутрішнього виміру ЄС, потребує вдосконалення. Необхідність посилення стратегії інноваційного розвитку була продиктована тим, що у подоланні сучасних енергетичних викликів, з якими стикаються країни ЄС, та для досягнення амбітних цілей сталого розвитку значну роль відіграватимуть ті дослідження та інновації, які дозволять вивести на ринок нові, високопродуктивні та доступні низьковуглецеві технології. З іншого боку, стійкий прогрес у збільшенні частки відновлюваних джерел енергії також потребував створення інноваційних рішень для забезпечення більшої гнучкості в управлінні енергоспоживанням і вдосконалення енергетичної системи.

У 2014 р. ключові засади декарбонізації, енергетичної безпеки та конкурентоспроможності європейських економік і відповідної інноваційної діяльності були визначені «Рамковою основою для кліматичної та енергетичної політики на період з 2020 до 2030 рр.» [4]. Враховуючи зміни, які відбулись в європейських економіках внаслідок модернізації та поширення інноваційних технологій у виробництві,

передачі, розподілі та споживанні енергії, кліматичною та енергетичною політикою ЄС були визначені нові кількісні цільові показники. У першу чергу це зміни показника цільового скорочення викидів парникових газів, які до 2030 р. мають досягнути 40% у порівнянні з 1990 р. Це скорочення одночасно пов'язане зі збільшенням частки енергоспоживання за рахунок використання відновлюваних джерел енергії щонайменше до 27% і підвищенням енергоефективності принаймні до 27%. Слід додати, що за висновками Європейської Ради індикативний показник енергоефективності має бути переглянутий до 2020 р. і збільшений до 30%. Переадресування витрат з паливних ресурсів на низьковуглецеві технології пришвидшить основний фінансовий ефект декарбонізації. На підставі економічного аналізу, проведеного Єврокомісією, зазначається, що витрати на виконання поставлених цілей і досягнення декарбонізації до 2050 р. суттєво не відрізнятимуться від витрат, які були б необхідні для заміни застарілих об'єктів енергосистеми. Втім нова політика є досить гнучкою для держав-членів, за якими залишається право виконання цілей щодо скорочення викидів парникових газів в найбільш економічно ефективний спосіб відповідно до енергетичного міксу і потужностей відновлюваної енергетики в структурі їх паливно-енергетичних балансів. Закладений політикою рівень цільового показника з відновлюваних джерел енергії стимулюватиме продовження вкладання інвестицій у даний сектор. Однак, у документі також відмічаються деякі наслідки стрімкого поширення технологій з відновлюваних джерел енергії. Зокрема, відновлювана енергетика впливає на конкурентоспроможність інших джерел енергії, хоча вони, як і раніше, будуть мати основне значення для енергетичної системи ЄС, знижує інвестиційні стимули для генеруючих потужностей, що необхідні для переходу до більш конкурентоспроможної, безпечної і сталої енергетичної системи, а також створює деякі проблеми для систем електропостачання, які мають адаптуватися до все більш децентралізованого і змінного виробництва сонячної і вітрової енергетики. Тому у майбутньому вигоди технологій відновлюваної енергетики мають бути використані в повній мірі лише у спосіб, який є максимально керований ринком. Важливою умовою для інновацій є покращення інвестиційного клімату і надання державної підтримки. У цьому контексті слід відмітити, що для забезпечення конкуренції на інтегрованих ринках у новій енергетичній політиці зазначається необхідність змін у підходах до державного фінансування інновацій у сфері енергетики та навколишнього середовища. Надалі принципи державної підтримки інноваційних технологій в енергетиці будуть формуватися за більш ринково-орієнтованим підходом. Зокрема, державне субсидування у 2020-2030 рр. у сфері відновлюваної енергетики має бути повністю припинено для інноваційних технологій, що перейшли у життєвому циклі інновацій на стадію зрілості. Втім, як і раніше, підтримка буде надаватися новим технологіям і технологіям, які знаходяться на стадіях розробки та зростання і мають значний потенціал. Поряд з важливістю відновлюваної енергетики значний фокус для досягнення цілей, закладених у новій кліматичній і енергетичній політиці, робиться також на необхідності підвищення ефективності використання енергії і проведення для цього відповідних досліджень та інновацій.

Прийнята у 2014 р. «Європейська стратегія енергетичної безпеки» [5] надала подальший імпульс до посилення інноваційного розвитку. Як зазначається в документі, у часовому горизонті 2030 р. реалізація цілей і завдань енергетичної та кліматичної політики ЄС має надати суттєві вигоди для енергетичної безпеки. Зокрема, зниженню енергетичної залежності сприятиме збільшення частки місцевих джерел енергії завдяки впровадженню технологій відновлюваної енергетики та скорочення обсягів енергоспоживання за допомогою інноваційних підходів у сфері енергоефективності. Для оцінки рівня енергетичної безпеки Європейською Комісією було запропоновано три індикатора, за допомогою яких можна проводити моніторинг реалізації завдань стратегії енергетичної безпеки ЄС. До першого з них відноситься диверсифікація імпорту енергоносіїв і місцеві джерела енергії, що використовуються у енергоспоживанні, до другого – розгортання інтелектуальних мереж і прогрес у поєднанні енергосистем країн ЄС, а до третього - технологічні інновації. Потенціал енергетичної безпеки на боці пропозиції посилює розвиток нових більш ефективних, чистих, надійних і конкурентоспроможних енергетичних технологій. Безпека інфраструктури мереж потребує досліджень та інновацій, пов'язаних з інтеграцією енергосистеми. На боці попиту інноваційні рішення мають забезпечити значне поліпшення енергоефективності міст, особливо в будівельному секторі, промисловості і транспорті. Однак, при проведенні інноваційних трансформацій енергосистеми ЄС, структура якої формується із складних ланцюгів, що зв'язують паливно-енергетичні ресурси, процеси перетворення, виробництва, транспортування і споживання енергії, обов'язково мають враховуватися можливі ризики. Тому наведені в стратегії ключові сфери для наукових досліджень та інновацій були визначені з урахуванням ризиків і аспектів безпеки для кожної зі складових структури енергосистеми. Іншим важливим рішенням стратегії було визначення необхідності оновлення попереднього SET-Plan, як головного інструмента ЄС з розвитку, координації і підтримки дослідно-інноваційної діяльності. На виконання завдань стратегії у грудні 2014 р. було розроблено оглядовий аналітичний документ «Щодо Інтегрованої Дорожньої карти: виклики у сфері досліджень та інновацій та потреби енергетичної системи ЄС», який далі був розглянутий і доповнений коментарями Керівної групи SET-Plan. Важливою рисою Інтегрованої Дорожньої карти було те, що підхід, застосований при її розробці, охоплював всі елементи енергетичної системи і при визначенні напрямків

дослідницько-інноваційної діяльності для переходу до низьковуглецевої економіки були враховані потреби енергосистеми в цілому. У документі були розглянуті та проаналізовані чотири основні виклики енергетичної політики: активні споживачі, попит у контексті підвищення ефективності використання енергії по всіх ланцюгах енергетичної системи, оптимізація енергосистеми та безпечні, економічно ефективні, чисті і конкурентні енергопоставки. Для цих сфер були визначені спектр дій, необхідних для трансформації енергетичної системи в середньо- і довгостроковій перспективі, відповідні сфери досліджень та інновації, а також головні детермінанти інноваційних процесів.

Слід зазначити, що у всіх розглянутих політичних і стратегічних документах ЄС енергоефективність визначається як одна з основних умов реалізації головних засад європейського розвитку: безпеки енергопоставок, підвищення конкурентоспроможності та переходу до низьковуглецевої економіки. Про надзвичайну пріоритетність даного напрямку інноваційного розвитку свідчить видання у 2014 р. Повідомлення Комісії для Європейського Парламенту та Ради «Енергоефективність та її внесок у забезпечення енергетичної безпеки» [6]. Однак, для того, щоб повністю розблокувати наявний потенціал енергоефективності, потрібні нові підходи. Важливою умовою для поширення інновацій з енергоефективності є створення ринку інноваційних енергетичних послуг та розробка відповідного підтримуючого законодавчого середовища. Необхідність поширення інноваційних рішень з енергоефективності пов'язана не лише із збільшенням попиту на паливно-енергетичні ресурси внаслідок економічного зростання виробництва (промисловості, сільського господарства), розвитку транспорту, будівництва, сфери послуг, покращення рівня якості життя та добробуту як окремих кінцевих споживачів, так і суспільства в цілому. Головними драйверами інноваційних процесів з енергоефективності є залежність від імпорту енергоресурсів, зростання вартості електроенергії, зміни у державному регулюванні національних електроенергетичних секторів, а також економічний потенціал нових енергоефективних технологій та сервісних бізнес-моделей, орієнтованих на кінцевого споживача. Іншим суттєвим чинником є прогнозований зростаючий рівень витрат, пов'язаних з викидами CO₂ та інших парникових газів.

Вирішальне значення для зміцнення пріоритетності інноваційного розвитку в енергетиці мала «Рамкова стратегія для стійкого енергетичного союзу з довгостроковою політикою щодо зміни клімату» (далі Стратегія енергетичного союзу) [7], яка була прийнята у лютому 2015 р. в умовах негайної необхідності фундаментальної трансформації енергетичної системи Європи. У документі зазначається, що досягнення амбітних цілей і виконання завдань кліматичної та енергетичної політики ЄС можливо лише за умови відходу від економіки, розвиток якої базується і залежить від викопних видів палива, та від енергетики, що заснована на централізованому підході, представляє інтереси з боку пропозиції, спирається на старі технології та несучасні бізнес-моделі. Разом з цим мають відбуватися зміни на боці попиту, які полягають у розширенні можливостей кінцевих споживачів щодо вибору варіантів і інструментів для гнучкого управління як попитом, так і постачанням. Трансформація всієї енергетичної системи також необхідна для подолання існуючої фрагментарності системи, для якої характерні неузгодженості національних політик, ринкові бар'єри та наявність енергетично ізольованих територій. Для забезпечення більшої енергетичної безпеки, стійкості та конкурентоспроможності європейських економік у документі визначено п'ять взаємодоповнюючих та взаємопов'язаних вимірів, що визначають принципові засади перетворення енергетичної системи ЄС. Перший вимір – це енергетична безпека, солідарність і довіра; другий – повністю інтегрований європейський енергетичний ринок; третій – енергоефективність, що сприяє поміркованості попиту; четвертий – декарбонізація економіки і п'ятий – дослідження, інновації та конкурентоспроможність. Реалізація цілей та завдань Стратегії енергетичного союзу потребуватиме розширення технологічних границь досліджень та інновацій для серйозних проривів у сферах відновлюваної енергетики, низьковуглецевих технологій, розробки інноваційних рішень для об'єктів генерації, мереж, посилення інноваційних процесів, пов'язаних з енергоефективністю, поширення інновацій та їх поглинання ринком завдяки створенню нових бізнес-моделей та інструментів для їх ринкової та соціальної адаптації. У якості пріоритетних були визначені напрями досліджень та інновацій, які допоможуть не лише задовольнити зростаючі енергетичні потреби суспільства, вони також сприятимуть підтримці робочих місць, трансферу технологій та розвитку ринків.

З метою вдосконалення інвестиційно-інноваційної політики в сфері досліджень та інновацій у вересні 2015 р. було видано Повідомлення Комісії «Щодо Інтегрованого стратегічного плану енергетичних технологій: прискорення трансформації Європейської енергетичної системи» [8]. Цим документом був окреслений пріоритетний спектр технологій, які мають супроводжуватися більш ефективним використанням фінансових і людських ресурсів, та були оприлюднені напрями досліджень та інновацій, які є найбільш актуальними для досягнень цілей енергетичної та кліматичної політики ЄС і реалізації завдань Стратегії енергетичного союзу. Даний документ був створений на підставі Інтегрованої Дорожньої карти з урахуванням політичних пріоритетів Стратегії енергетичного союзу і Дорожньої карти для енергетичного союзу. Пріоритетність досліджень та інновацій в енергетичному секторі та сферах кінцевого споживання, яка закріплена Стратегією енергетичного союзу як окремий обов'язковий вимір,

ґрунтується на тому, що реалізація всіх інших вимірів пов'язана з розвитком інноваційної діяльності. Завданням нового Інтегрованого стратегічного плану енергетичних технологій було забезпечення цілісного підходу з досліджень та інновацій в галузі енергетики, новітніх енергетичних технологій і технологій з низьким вмістом вуглецю. Комплексний і системний підхід був досягнутий завдяки переходу від вертикального підходу із зосередженням на конкретній технології до горизонтально-інтегрованого підходу, який розглядає енергетичну систему в цілому. Це дозволило сформулювати більш цілеспрямовані та інтегровані пріоритети, за якими було визначено десять стратегічних напрямів досліджень та інновацій за шістьма основними сферами, пов'язаними з декарбонізацією економіки та ефективним і конкурентним виробництвом, передачею, розподілом і споживанням енергії. Ці напрями є структурованими навколо науково-дослідних та інноваційних пріоритетів Стратегії енергетичного союзу щодо прискорення трансформації енергетичної системи ЄС і реалізації мети ЄС щодо світового лідерства в області розгортання і використанні відновлювальних джерел енергії.

Інформаційна модель з динаміки формування політичних і стратегічних чинників ЄС, що закладають напрями інноваційного розвитку в енергетичному секторі та сферах кінцевого споживання, наведена у вигляді структурно-логічної схеми на рис. 2.

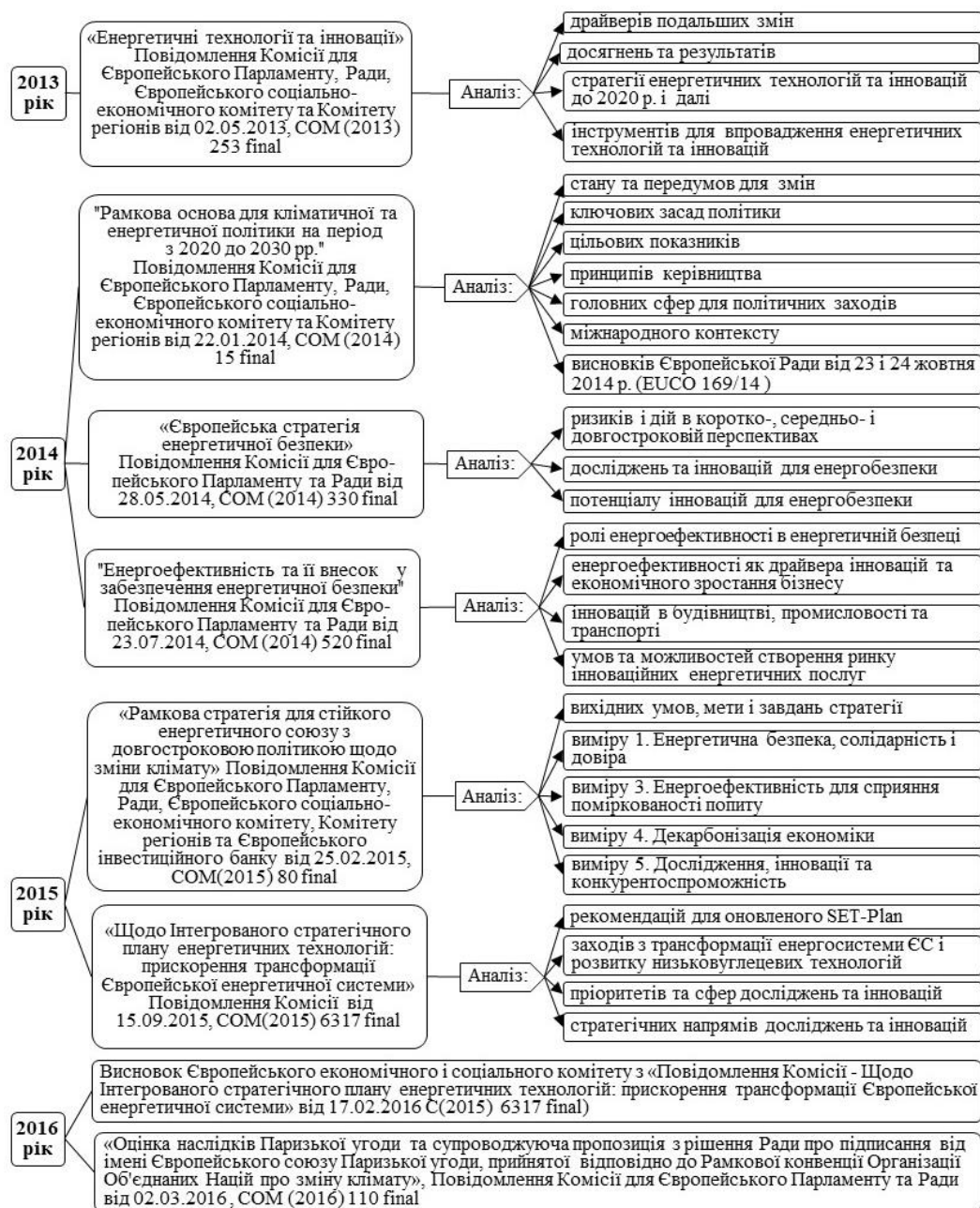


Рисунок 2 – Структурно-логічна схема інформаційної моделі з динаміки формування політичних і стратегічних чинників, що закладають напрями інноваційного розвитку в енергетиці ЄС

Побудована інформаційна модель відображає еволюцію прийняття засадоутворюючих правових актів ЄС у сфері досліджень та інновацій для декарбонізації економіки та трансформації енергетичної системи ЄС, а також характеризує етапи, задачі та спектр питань, що розглядаються у ході аналізу політичних і стратегічних чинників інноваційного розвитку ЄС в енергетиці. Визначені завдяки узагальнюючому системному підходу пріоритети мають полегшити координацію та інвестування у розробку нових науково-дослідних та інноваційних програм на європейському та національному рівнях. Значна увага також надається питанням комерціалізації та виведення інновацій на ринок. Проблема, що існує в ЄС для інвесторів інноваційних технологій, полягає у розриві між фазою демонстрації та фазою комерціалізації інновацій. Рішення цієї проблеми вимагає більш широкого доступу до ризикового фінансування та узгодження між ЄС і національними програмами досліджень в області енергетики й інновацій у питаннях координації джерел фінансування.

Тенденції змін у європейському енергетичному регуляторному середовищі. В останній чверті 20-го століття інновації, що впроваджувались в електроенергетичному секторі на європейському енергетичному просторі, носили сталий, прирістний і компонентний характер. Такі інновації запроваджувались переважно на стороні пропозиції вертикально інтегрованими енергетичними компаніями, що відповідало, підтримувалось і вкладалося у традиційні регуляторні рамки («традиційне» регулювання). Процеси реструктуризації, демонополізації та лібералізації електроенергетичного сектору, активність яких припадає на кінець 20-го та початок 21-го століття, були викликані та супроводжувались радикальними системними інноваціями на стороні пропозиції і радикальними компонентними інноваціями на стороні попиту. Це «інноваційно підірвало» європейський енергетичний простір та сприяло запровадженню конкуренції на європейських ринках електричної енергії.

Усвідомлення проблеми зміни клімату та поступове інформування споживачів електроенергії, зокрема, побутових, про досягнення технічного прогресу і відкриті технічні інновації, наявність і доступність інноваційних технологій виробництва електричної енергії з відновлюваних джерел енергії, сприяло запровадженню ринків розосередженого малопотужного виробництва електроенергії на стороні попиту. Як наслідок, виробництво «традиційної» електричної енергії було доповнено виробництвом «зеленої» електроенергії, яка вже не розглядалася певним шаром споживачів як товар заміник «традиційній» електроенергії. Це, в свою чергу, призвело до виникнення потреби у розмежуванні ринків «традиційної» та «зеленої» електричної енергії та наданні споживачам права вибору «зеленої» електроенергії. Можливість використання технологій виробництва електроенергії з відновлюваних джерел розділила споживачів електричної енергії на «активних» і «пасивних», які відповідно є менш або більш залежними від зовнішнього електропостачання.

Різноманітність та множина інновацій в енергетичному секторі змусили «традиційне» регулювання реагувати на їх розвиток, втім на початку воно залишалося в своїх традиційних рамках. Подальший процес інтеграції європейського енергетичного ринку характеризувався централізацією на європейському рівні та децентралізацією на національному рівні внаслідок інновацій виробництва електроенергії на національних ринках. Це поставило принципове питання щодо спроможності «традиційного» регулювання реагувати в існуючих рамках на інновації в енергетичному секторі у такій спосіб, який би мінімізував ризики або максимізував вигоди від їх запровадження, при цьому сприяючи їх подальшому розвитку. Сьогоднішні зміни у європейському енергетичному законодавстві щодо регулювання у сфері енергетики свідчать про розширення рамок «традиційного» регулювання саме задля реагування на інновації. Це дозволяє стверджувати, що наповнюючись власними «регуляторними» інноваціями «традиційне» регулювання на європейському енергетичному просторі має стійку тенденцію переходу до «інноваційного» регулювання.

В Україні важливість передових технологій та інновацій для побудови сильної економіки зазначається в Указі Президента України від 12.01.2015 № 5/2015 «Про Стратегію сталого розвитку "Україна - 2020"» (далі Стратегія «Україна – 2020») [11]. Дорожньою картою Стратегії "Україна - 2020" визначені основні вектори і пріоритети розбудови національної економіки, за якими сформовані відповідні програми дій. За вектором безпеки програма енергонезалежності, що зазначена як один з першочергових пріоритетів, ставить у якості головних завдань забезпечення енергетичної безпеки та перехід до ефективного енерговикористання. До пріоритетів за вектором розвитку віднесені реформа енергетики і впровадження програми енергоефективності. Слід зазначити, що інноваційний розвиток української енергетики визначається як одна з важливих умов реалізації завдань за програмою енергонезалежності, реформи енергетики і програми енергоефективності. У міжнародному контексті розгортання інноваційних процесів в енергетичній системі країни є важливою умовою інтеграції в енергетичний простір ЄС. Щодо реформи енергетики та програми енергоефективності, то Розпорядженнями Кабінету Міністрів України у серпні 2017 р. було ухвалено Енергетичну стратегію України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність», а у червні 2018 р. був затверджений план заходів з реалізації її етапу з реформування енергетичного сектору [12].

Досягнення цілей і виконання завдань, закладених у політичні та стратегічні документи України за програмами енергонезалежності, енергоефективності та реформи енергетики, потребують вдосконалення

інноваційної політики. Умови та правила функціонування енергетичного сектору визначаються регуляторним середовищем. Тому поширення енергетичних інновацій в енергетичному секторі, впровадження змін існуючих бізнес-моделей як у ринковому середовищі, так і у сферах кінцевого енергоспоживання потребує взаємопов'язаних змін у регуляторній сфері. Рівень готовності законодавчого середовища до інноваційного розвитку в енергетиці буде мати значний вплив на поширення інноваційних процесів та зростання інноваційної діяльності. Вирішальне значення в цьому аспекті має посилення політики інноваційного розвитку в енергетиці. Існуюче правове середовище потребує вдосконалення у контексті посилення правових детермінант інноваційного розвитку в енергетиці. Зокрема, мають відбуватися зміни, спрямовані на зміцнення власного інноваційного потенціалу та розгортання інноваційних процесів в сфері енергетики і кінцевого споживання, а також зростання трансферу новітніх рішень і прискорення поглинання ринком зрілих енергоефективних і низьковуглецевих технологій.

Інноваційний розвиток в енергетиці має ґрунтуватися як на розробці та впровадженні власної високотехнологічної продукції і технологій, створених на підставі вітчизняного науково-технічного потенціалу, так і на широкому залученні і використанні міжнародних науково-дослідних та інноваційних досягнень.

Для кращої організації науково-інноваційної діяльності з розробки новітніх енерготехнологій, виведення їх на ринок, а також для створення умов, спрямованих на зниження витрат та більш ефективної комерціалізації цих інновацій необхідне вдосконалення політичних, правових, інституційних та фінансових інструментів. Досягнення більш високих рівнів економічної продуктивності за рахунок диверсифікації, технологічної модернізації та енергоефективності шляхом реалізації складових інноваційного розвитку в енергетиці потребує посилення міжнародних зав'язків. Декарбонізація економіки потребує щорічного фінансування в новітні технології виробництва екологічно чистої енергії, підвищення енергоефективності паливно-енергетичного сектору та промисловості, забудованого середовища (міст і муніципальних утворень в цілому, нових і вже існуючих будівель тощо) та транспортні системи. Драйверами розгортання новітніх технологій на внутрішньому ринку будуть скорочення витрат на паливно-енергетичні ресурси, покращення навколишнього середовища та зниження рівня антропогенного впливу на зміни клімату.

Експорт новітніх технологій та інноваційного досвіду на зовнішні ринки буде стимулюватися необхідністю досягнення більш високих рівнів економічної продуктивності за рахунок диверсифікації, технологічної модернізації та енергоефективності. Однак дослідження та інновації в енергетичній галузі в Україні часто не мають достатнього фінансування і координації. Тому реалізація складових інноваційного розвитку в енергетиці потребує посилення міжнародних зав'язків. Оскільки Україна має інтегруватися в енергетичний простір ЄС, дуже важливим є врахування тенденцій інноваційного розвитку. Виходячи з цих умов, в основу методологічного обґрунтування принципів інноваційного менеджменту в енергетиці мають бути покладені концептуальні положення політики ЄС стосовно інновацій та інноваційної діяльності в енергетиці, а також вимоги державної інноваційної політики, що визначена відповідною нормативно-правовою базою України. Важливим також є аналіз змін регуляторного середовища, яке сьогодні саме стає предметом інноваційного розвитку енергетики.

Для України, яка є членом Європейського Енергетичного Співтовариства та підписала Угоду про асоціацію з ЄС, є важливим, щоб інноваційні трансформації вітчизняного енергетичного сектору відбувалися з урахуванням європейських пріоритетів і тенденцій. Це сприятиме зміцненню міжнародного співробітництва в галузі наукових досліджень та інновацій в сфері енергетики, забезпечуватиме підґрунтя для інтеграції країни в енергетичний простір ЄС, а також розширюватиме можливості інвестицій в низьковуглецеві енергетичні технології та енергоефективність.

Висновки

В роботі проведено системне дослідження змін, що відбулися останніми роками в енергетичній політиці ЄС та політиці з інноваційної діяльності в енергетиці. За результатами дослідження:

- надано характеристику сучасних тенденцій, цілей, основних завдань та напрямів інноваційного розвитку в енергетичному секторі та сферах кінцевого енергоспоживання ЄС;
- побудовано інформаційну модель з динаміки формування політичних і стратегічних чинників, що закладають напрями інноваційного розвитку в енергетиці ЄС;
- розглянуто специфіку інноваційних процесів, пов'язаних з функціонуванням енергетичного бізнесу, енергетичних ринків і ринків енергоефективних технологій та пріоритети інноваційного розвитку за напрямками виробництва, передачі, розподілу та споживання енергії;
- зазначено важливість переходу в енергетичному секторі до сервіс-орієнтованих бізнес-моделей, які є більш ринковими в умовах трансформації енергетичної галузі та енергетичних ринків;
- наведено тенденції змін у європейському енергетичному регуляторному середовищі, що відбулись внаслідок розвитку та посилення комерціалізації інновацій в умовах енергетичного переходу та змін у європейському енергетичному ландшафті країн ЄС;

- надано характеристику стратегічних пріоритетів та умов, необхідних для зміцнення інноваційного розвитку і поширення енергетичних інновацій в Україні у довгостроковій перспективі.

Список використаної літератури

1. Особливості реалізації політики енергоефективності – пріоритети України / С. П. Денисюк // Енергетика: економіка, технології, екологія : науковий журнал. – 2013. – № 3(34). – С. 7–20.
2. UNITED NATIONS. SUSTAINABLE DEVELOPMENT. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development: [Електрон. ресурс]. - Режим доступу <https://sustainabledevelopment.un.org/post2015/transformingourworld>
3. EUROPA. EU law and publications. COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS. Energy Technologies and Innovation: [Електрон. ресурс]. - Режим доступу <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX:52013DC0253>
4. EUROPA. EU law and publications. COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS. A policy framework for climate and energy in the period from 2020 to 2030: [Електрон. ресурс]. - Режим доступу <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX:52014DC0015>
5. EUROPA. EU law and publications. COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT AND THE COUNCIL European Energy Security Strategy: [Електрон. ресурс]. - Режим доступу <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX:52014DC0330&qid=1407855611566>
6. EUROPA. EU law and publications. COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT AND THE COUNCIL. Energy Efficiency and its contribution to energy security and the 2030 Framework for climate and energy policy: [Електрон. ресурс]. - Режим доступу <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=celex:52014DC0520>
7. EUROPA. EU law and publications. COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE, THE COMMITTEE OF THE REGIONS AND THE EUROPEAN INVESTMENT BANK. A Framework Strategy for a Resilient Energy Union with a Forward-Looking Climate Change Policy: [Електрон. ресурс]. - Режим доступу <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=COM:2015:80:FIN>
8. EUROPEAN COMMISSION. Energy. Communication from the Commission - Towards an integrated Strategic Energy Technology (SET) Plan: accelerating the European energy system transformation (COM (2015) 6317 final): [Електрон. ресурс]. - Режим доступу <https://ec.europa.eu/energy/en/publications/towards-integrated-strategic-energy-technology-set-plan-accelerating-european-energy>
9. EUROPA. EU law and publications. Opinion of the European Economic and Social Committee on the ‘Communication from the Commission — Towards an integrated Strategic Energy Technology (SET) Plan: accelerating the European energy system transformation’ (C(2015) 6317 final): [Електрон. ресурс]. - Режим доступу <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX:52015AE5124>
10. EUROPA. EU law and publications. COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT AND THE COUNCIL The Road from Paris: assessing the implications of the Paris Agreement and accompanying the proposal for a Council decision on the signing, on behalf of the European Union, of the Paris agreement adopted under the United Nations Framework Convention on Climate Change: [Електрон. ресурс]. - Режим доступу <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1469270126872&uri=CELEX:52016DC0110>
11. Указ Президента України «Про Стратегію сталого розвитку "Україна - 2020" від 12.01.2015 № 5/2015: [Електрон. ресурс]. - Режим доступу <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/5/2015>
12. Розпорядження Кабінету Міністрів України «Про схвалення Енергетичної стратегії України на період до 2035 року “Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність”» від 18 серпня 2017 р. № 605-р: [Електрон. ресурс]. - Режим доступу <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/605-2017-%D1%80>

EUROPEAN TENDENCIES OF INNOVATIVE DEVELOPMENT FOR ENERGY SECTOR AND
FINAL ENERGY CONSUMPTION

S. Denysiuk, Dr. Eng. Sc., Prof., ORCID 0000-0002-6299-368

H. Strelkova, Cand. Sc. (Phys. & Math.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0002-5708-1134

C. Pfeiffer, Dr. Eng. Sc., Prof., ORCID 0000-0002-2265-6495

M. Strelkov, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0002-4320-7162

O. Ishchenko, Msc.; ORCID 0000-0003-3315-4842

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kiev Polytechnic Institute”

University of Southeastern Norway

In order to identify the EU tendencies and priorities a systematic study of the changes that occurred during recent years in the EU energy policy and energy innovation policy has been conducted. The characteristic of modern tendencies, goals, main objectives and directions of innovative development in the energy sector and the areas of final energy consumption of the EU is given. An informational model on the dynamics of forming the political and strategic factors, which found direction of innovative development in the energy sector of the EU, has been constructed. The peculiarities of innovative processes connected with functioning the energy business, energy markets and energy efficient technologies market as well as the priorities of innovative development in the areas of energy production, transmission, distribution and consumption are considered. The importance of the transition in the energy sector to service-oriented business models that are more marketable in the context of transforming the energy industry and energy markets is noted. The tendencies of changes in the European energy regulatory environment, which took place as a result of the development and strengthening the commercialization of innovations in the conditions of energy transition and changes in the European energy landscape, are presented. The characteristic of the strategic priorities and conditions necessary to strengthen the innovative development and the spread of energy innovation in Ukraine in the long-term perspective is given.

Key words: energy sector, innovations in energy, energy legislation, energy supply, final energy consumption, energy efficiency, energy markets, regulation.

References

1. Osoblyvosti realizatsii polityky enerhoefektyvnosti – priorityty Ukrainy / S. P. Denysiuk // *Enerhetyka: ekonomika, tekhnolohii, ekolohiia* : naukovyi zhurnal. – 2013. – № 3(34). – S. 7–20.
2. UNITED NATIONS. SUSTAINABLE DEVELOPMENT. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development: [Elektron. resurs]. - Rezhym dostupu <https://sustainabledevelopment.un.org/post2015/transformingourworld>
3. EUROPA. EU law and publications. COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS. Energy Technologies and Innovation: [Elektron. resurs]. - Rezhym dostupu <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX:52013DC0253>
4. EUROPA. EU law and publications. COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS. A policy framework for climate and energy in the period from 2020 to 2030: [Elektron. resurs]. - Rezhym dostupu <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX:52014DC0015>
5. EUROPA. EU law and publications. COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT AND THE COUNCIL European Energy Security Strategy: [Elektron. resurs]. - Rezhym dostupu <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX:52014DC0330&qid=1407855611566>
6. EUROPA. EU law and publications. COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT AND THE COUNCIL. Energy Efficiency and its contribution to energy security and the 2030 Framework for climate and energy policy: [Elektron. resurs]. - Rezhym dostupu <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=celex:52014DC0520>
7. EUROPA. EU law and publications. COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE, THE COMMITTEE OF THE REGIONS AND THE EUROPEAN INVESTMENT BANK. A Framework Strategy for a Resilient Energy Union with a Forward-Looking Climate Change Policy: [Elektron. resurs]. - Rezhym dostupu <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=COM:2015:80:FIN>
8. EUROPEAN COMMISSION. Energy. Communication from the Commission - Towards an integrated Strategic Energy Technology (SET) Plan: accelerating the European energy system transformation (COM (2015) 6317 final): [Elektron. resurs]. - Rezhym dostupu <https://ec.europa.eu/energy/en/publications/towards-integrated-strategic-energy-technology-set-plan->

[accelerating-european-energy](#)

9. EUROPA. EU law and publications. Opinion of the European Economic and Social Committee on the ‘Communication from the Commission — Towards an integrated Strategic Energy Technology (SET) Plan: accelerating the European energy system transformation’ (C(2015) 6317 final): [Elektron. resurs]. - Rezhym dostupu <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX:52015AE5124>

10. EUROPA. EU law and publications. COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT AND THE COUNCIL The Road from Paris: assessing the implications of the Paris Agreement and accompanying the proposal for a Council decision on the signing, on behalf of the European Union, of the Paris agreement adopted under the United Nations Framework Convention on Climate Change: [Elektron. resurs]. - Rezhym dostupu <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1469270126872&uri=CELEX:52016DC0110>

11. Ukaz Prezidenta Ukrainy «Pro Stratehiiu staloho rozvytku "Ukraina - 2020" vid 12.01.2015 № 5/2015: [Elektron. resurs]. - Rezhym dostupu <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/5/2015>

12. Rozporiadzhennia Kabinetu Ministriv Ukrainy «Pro skhvalennia Enerhetychnoi stratehii Ukrainy na period do 2035 roku “Bezpeka, enerhoefektyvnist, konkurentospromozhnist”» vid 18 serpnia 2017 r. № 605-r: [Elektron. resurs]. - Rezhym dostupu <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/605-2017-%D1%80>

УДК 620.91+ 621.31

ЕВРОПЕЙСКИЕ ТЕНДЕНЦИИ ИННОВАЦИОННОГО РАЗВИТИЯ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ СЕКТОРЕ И СФЕРЕ КОНЕЧНОГО ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ

С.П. Денисюк, д-р техн. наук, профессор; ORCID 0000-0002-6299-368

Г.Г. Стрелкова, канд. физ.-мат наук, доцент; ORCID 0000-0002-5708-1134

К.Ф. Пфайфер, д-р техн. наук, профессор; ORCID 0000-0002-2265-6495

М.Т. Стрелков, канд. техн. наук, доцент; ORCID 0000-0002-4320-7162

О.С. Ищенко, магистр; ORCID 0000-0003-3315-4842

Национальный технический университет Украины

«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

Университет Юго-Восточной Норвегии

В работе проведено системное исследование изменений, произошедших в последние годы в энергетической политике ЕС и политике по инновационной деятельности в энергетике, с целью определения тенденций и приоритетов ЕС. Дана характеристика современных тенденций, целей, основных задач и направлений инновационного развития в энергетическом секторе и сферах конечного энергопотребления ЕС. Построена информационную модель динамики формирования политических и стратегических факторов, закладывающих направления инновационного развития в энергетике ЕС. Рассмотрена специфика инновационных процессов, связанных с функционированием энергетического бизнеса, энергетических рынков и рынков энергоэффективных технологий, и приоритеты инновационного развития по направлениям производства, передачи, распределения и потребления энергии. Указана важность перехода в энергетическом секторе к сервис-ориентированным бизнес-моделям, которые являются более рыночными в условиях трансформации энергетической отрасли и энергетических рынков. Приведены тенденции изменений в европейской энергетической регуляторной среде, произошедшие вследствие развития и усиления коммерциализации инноваций в условиях энергетического перехода и изменений в европейском энергетическом ландшафте. Дана характеристика стратегических приоритетов и условий, необходимых для укрепления инновационного развития и распространения энергетических инноваций в Украине в долгосрочной перспективе.

Ключевые слова: энергетический сектор, инновации в энергетике, энергетическое законодательство, энергоснабжение, конечное энергопотребление, энергоэффективность, энергетические рынки, регулирование.

Надійшла 25.06.2018

Received 25.06.2018

SMART GRID СИСТЕМИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ SMART GRID SYSTEM AND TECHNOLOGY

УДК 621.311.153

О.В. Коцар, канд. техн. наук, доц. ORCID 0000-0002-7958-2335
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

SMART-СИСТЕМИ ВИМІРЮВАННЯ, ОБЛІКУ ТА УПРАВЛІННЯ ЕНЕРГОВИКОРИСТАННЯМ

У статті висвітлено тривалий шлях розвитку АСКОЕ, в тому числі процеси їх створення, вдосконалення і застосування для контролю, обліку і управління режимами електроспоживання. Доведено, що головним завданням АСКОЕ є управління енергоспоживанням з метою підвищення рівня енергоефективності та запобігання шкідливому впливу на навколишнє середовище. Обґрунтовано безпосередній зв'язок АСКОЕ зі Smart Grid-технологіями. Показано вагомий внесок фахівців Інституту енергозбереження та енергоменеджменту КПІ ім. Ігоря Сікорського в процеси впровадження сучасних Smart-систем вимірювання, обліку та управління енерговикористанням, зокрема, на етапах становлення і лібералізації ринку електричної енергії України.

Ключові слова: АСКОЕ, дані обліку, електроенергія, лічильник електроенергії, облік, ринок електричної енергії, Smart Grid, Smart Meter, Smart Metering System.

Прийняття Закону України «Про ринок електричної енергії» [1] спрямовано на подальшу лібералізацію ринку електричної енергії України, що має на меті, зокрема, забезпечення недискримінаційного доступу споживачів до електроенергетичних ресурсів на конкурентних засадах, стимулювання гравців ринку до енергоефективної поведінки та мінімізацію негативного впливу на довкілля, переважно, через широке застосування розосередженої генерації на базі альтернативних і відновлювальних джерел енергії, раціональне використання енергетичних ресурсів, енергозаміщення, а також узгоджене управління попитом відповідно до пропозицій ринку в реальному часі. «Ключовим аспектом є забезпечення гарантованого доступу споживачів до об'єктивних і прозорих даних стосовно споживання енергії, пов'язаних із ним цін та вартості обслуговування таким чином, щоб вони могли запросити на основі таких даних конкурентні пропозиції. З іншого боку, споживачі також повинні мати право на належне інформування з достатньою частотою про їхнє енергоспоживання та енерговитрати, що створить стимули для заощадження енергії, оскільки надасть надійний зворотній зв'язок щодо результатів інвестицій в енергоефективність та зміну поведінки» [2].

Проблемами автоматизації обліку електроенергії в Радянському Союзі одними з перших почали займатися фахівці Київського політехнічного інституту (КПІ). Група молодих науковців, очолювана Артуром Веніаміновичем Праховником, під керівництвом завідуючого кафедрою електропостачання професора Василя Миколайовича Винославського ще наприкінці 60-х років минулого століття започаткувала розробки в галузі енергозбереження та управління електроспоживанням з використанням локальних пристроїв, на базі яких в подальшому почали створювати перші автоматизовані системи обліку електроенергії (АСОЕ). Саме науковцями КПІ було обґрунтовано, що головною метою створення АСОЕ є ефективне використання електричної потужності (електроенергії) через формування інформаційного забезпечення завдань управління режимами електроспоживання споживачів, і закладено методологічний базис застосування АСОЕ для управління енерговикористанням [3]. Згодом АСОЕ дістали подальшого розвитку і стали підкласом більш широкого класу автоматизованих систем контролю, обліку та управління енерговикористанням (АСКОЕ). Термін АСКОЕ також часто застосовується у вузькому сенсі – автоматизовані системи комерційного обліку електроенергії. З тих пір КПІ беззаперечно вважається провідною навчальною і науковою установою СРСР, а згодом й незалежної України, в сфері енергозбереження, енергоефективності, автоматизації обліку електроенергії та управління енерговикористанням. До речі, саме в Інституті енергозбереження та енергоменеджменту (ІЕЕ) НТУУ «КПІ» в 1997 році вперше в Україні було розпочато підготовку, а згодом і перепідготовку та підвищення кваліфікації фахівців за новою спеціальністю – «Енергетичний менеджмент».

АСКОЕ, які розроблено і впроваджено фахівцями КПІ протягом понад чотирьох десятиліть на численних електроенергетичних і промислових підприємствах України та за її межами, надійно

забезпечують формування інформаційного забезпечення комерційних розрахунків за електричну енергію, контролю параметрів режимів виробітку та споживання електроенергії, моніторингу результатів реалізації енергозберігаючих заходів та впровадження енергоефективних технологій, а також завдань управління попитом, зокрема, в умовах функціонування і розвитку ринку електричної енергії України.

За результатами багаторічних досліджень в ІЕЕ НТУУ «КПІ» в 1997 році було розроблено Концепцію побудови автоматизованих систем обліку електроенергії в умовах енергоринку України. В 2000 році вийшла в світ друга редакція зазначеної Концепції, яку було затверджено спільним наказом Мінпаливенерго, НКРЕ, Держкоменергозбереження, Держстандарту, Держбуду, Держпромполітики [4]. З тих пір Концепція [4] залишається майже єдиним чинним цілісним нормативним документом, який визначає концептуальні положення побудови АСОЕ в умовах функціонування ринку електричної енергії України та містить базові технічні вимоги до автоматизованих систем комерційного обліку електроенергії на об'єктах енергетики, промисловості, побуту та сфери послуг.

Відповідно до положень Концепції [4] фахівцями ІЕЕ НТУУ «КПІ» було створено Систему збору, обробки та обміну даними комерційного обліку електричної енергії в Оптовому ринку [5], яка забезпечила інтеграцію в єдину автоматизовану систему комерційного обліку Оптового ринку електричної енергії (ОРЕ) України АСКОЕ суб'єктів ОРЕ та інформаційно-обчислювальний комплекс (ІОК) Головного оператора на принципах уніфікації інформаційної взаємодії, а також розроблено технічні вимоги і попередні проектні рішення щодо створення Системи точного часу та підсистеми забезпечення синхронності вимірювань (СТЧіСВ) [6] з метою забезпечення одночасності вимірювань та прив'язки результатів диференційованого обліку електричної енергії до національної шкали часу.

В розвиток положень Концепції [4] та Загальних технічних вимог [5, 6] з метою уніфікації функціональних вимог до АСКОЕ суб'єктів ОРЕ в 2006 році ІЕЕ НТУУ «КПІ» було розроблено стандарт ОРЕ: «Автоматизовані системи комерційного обліку електроенергії суб'єктів ОРЕ. Загальні вимоги» [7]. В 2010 році, коли АСКОЕ суб'єктів ОРЕ було переважно побудовано і впроваджено в постійну (промислову) експлуатацію, з метою забезпечення повноти та достовірності даних комерційного обліку, які формувалися АСКОЕ суб'єктів ОРЕ, на замовлення Головного оператора фахівцями ІЕЕ НТУУ «КПІ» було розроблено автоматизовану інформаційну систему «Використання даних, отриманих з автоматизованих систем комерційного обліку електроенергії суб'єктів ОРЕ» (АІС ВДКО) [8]. Дані комерційного обліку, які надходять від АСКОЕ суб'єктів ОРЕ до ІОК Головного оператора, верифікуються АІС ВДКО та валідуються Головним оператором на підставі затвердженого у встановлений спосіб Порядку перевірки даних [9], що сприяє підвищенню достовірності та прозорості розрахунків в ОРЕ України.

З метою забезпечення ефективного застосування АСКОЕ ОРЕ в умовах подальшої лібералізації ринку електричної енергії України в 2011 році на замовлення ДП «Енергоринок» ІЕЕ НТУУ «КПІ» було розроблено Концепцію ІОК Головного оператора Системи комерційного обліку Оптового ринку електроенергії України [10], якою визначено напрями подальшого розвитку АСКОЕ ОРЕ України, зокрема, завдання Головного оператора щодо забезпечення надійного функціонування АСКОЕ ОРЕ, точності, повноти, цілісності, достовірності та актуальності даних комерційного обліку електроенергії під час функціонування діючої і запровадження перспективних моделей ринку електричної енергії України та на перехідних етапах. Положення Концепції [10] було реалізовано під час розробки фахівцями ІЕЕ НТУУ «КПІ» низки нормативних документів ОРЕ, а також враховано в Кодексі комерційного обліку електричної енергії [11].

Під час створення АСКОЕ фахівцями ІЕЕ КПІ ім. Ігоря Сікорського невідмінно застосовуються передові технічні рішення і новітні технології. Зокрема, під час побудови Системи збору, обробки та обміну даними комерційного обліку електричної енергії в Оптовому ринку [5] вперше розроблено та впроваджено в ОРЕ України уніфікований протокол передавання даних вимірювань (УППДВ), уніфіковану базу даних (УБД) та уніфікований реєстр даних (УРД) Головного оператора, а також розроблено систему ознак та кодування якості (достовірності) даних обліку, що дозволило забезпечити уніфікацію даних комерційного обліку електроенергії на всіх етапах їхнього передавання, приймання, оброблення, зберігання, верифікування та валідування в інтегрованій АСКОЕ ОРЕ України.

Велика увага приділяється підвищенню надійності АСКОЕ, в першу чергу з метою забезпечення точності, повноти, цілісності, достовірності та актуальності даних комерційного обліку, а також забезпечення функціонування АСКОЕ відповідно до регламентів ринку електричної енергії. Під час розробки АСКОЕ електропередавальних компаній – постачальників за регульованим тарифом (ПРТ) фахівцями КПІ ім. Ігоря Сікорського чи не вперше застосовано кластерні рішення, якими передбачено побудову головного сервера АСКОЕ на базі двовузлового відмовостійкого кластера і RAID-масиву та виділення центрального вузла АСКОЕ в окрему підмережу, відокремлену від загальної мережі компанії міжмережевими екранами з метою забезпечення безпеки даних комерційного обліку, їхньої цілісності та захисту від несанкціонованих впливів.

Ще у 80-х роках минулого століття в розподілених АСКОЕ підприємств електричних мереж та електроенергетичних систем, які впроваджувалися фахівцями КПП, застосовано передавання даних обліку на великі відстані лініями електропередачі (ЛЕП) із застосуванням каналів високочастотного (ВЧ) зв'язку. З широким розгортанням мереж стільникового зв'язку з'явилася можливість не лише використовувати технології GSM/GPRS, 3G, 4G LTE, а й дистанційно керувати роботою АСКОЕ, зокрема, з метою підвищення їхньої надійності, відновлення функціонування АСКОЕ та розширення їхніх функціональних можливостей, зокрема, забезпечення дистанційного доступу до первинних даних обліку з метою надійної верифікації та валідації даних комерційного обліку електроенергії. Сучасні АСКОЕ, які створено і впроваджено фахівцями КПП ім. Ігоря Сікорського, функціонують в автоматичному або автоматизованому режимі (за вибором оператора), метрологічно забезпечені, повною мірою відповідають чинним нормативним вимогам і забезпечують формування інформаційного забезпечення завдань розрахунків за електричну енергію, управління попитом, енергомоніторингу тощо.

Сьогодні фахівцями ІЕЕ КПП ім. Ігоря Сікорського проводяться наукові дослідження і практичні впровадження та закладається методологічний базис для широкого розгортання та ефективного застосування Smart-систем вимірювання, обліку та управління енерговикористанням, зокрема, в умовах подальшої лібералізації ринку електричної енергії України, маючи на меті в першу чергу підвищення рівня енергоефективності та скорочення шкідливого впливу на довкілля. Власне концепція Smart Grid передбачає розвиток електроенергетичних систем за трьома головними напрямками:

- вдосконалення інфраструктури;
- інформатизацію електричної мережі (накладання на електричну мережу цифрового шару);
- модернізація бізнес-процесів, що робить «розумну» мережу рентабельною.

Розвиток АСКОЕ в рамках концепції Smart Grid і перехід до широкого розгортання Smart-систем відбувається саме за цими напрямками.

Передавання даних обліку останнім часом все частіше відбувається з використанням PLC-технологій (power line communication). Протягом короткого часу Smart-системи на базі PLC «пройшли» чималий шлях від використання технології S-FSK (spread-frequency shift keying) до технологій OFDM (orthogonal frequency-division multiplexing), що дозволило суттєво підвищити швидкість та надійність передавання даних електричними мережами. Сьогодні стандарти PRIME та G3-PLC на базі OFDM активно конкурують в Smart-системах, пропонуючи потенційним користувачам нові якості. Зокрема, стандарт PRIME (Powerline Intelligent Metering Evolution) забезпечує найвищу на сьогодні швидкість передавання даних (до 128 Кбіт/сек) і розглядається в якості базового стандарту передавання даних Smart-мережами. Стандарт G3-PLC характеризується майже вчетверо нижчою швидкістю передавання даних (до 35 Кбіт/сек), але має чимало інших переваг, зокрема, сумісність з IPv6, можливість передавання даних гальванійно розв'язаними сегментами електричної мережі та подовження сегменту мережі передавання даних без проміжних посилювачів, а також сумісність зі стандартом S-FSK. Останнє забезпечує одночасне функціонування в єдиному сегменті електричної мережі Smart-систем на базі G3-PLC та S-FSK. З метою підвищення надійності передавання даних в сучасних Smart-системах застосовують резервування комунікацій, використовуючи для передавання даних PLC-технології, радіозв'язок (з використанням чарункових мереж) і технологій стільникового зв'язку.

Застосування PLC-технологій відкрило шляхи до запровадження спліт-рішень під час розгортання Smart-систем. Поділ лічильника електричної енергії на вимірювальну та інформаційну частини дозволяє суттєво підвищити точність обліку електроенергії через можливість інсталяції вимірювальної частини безпосередньо в точці комерційного обліку, а інформаційної частини – у споживача.

Комплексне забезпечення точності, повноти, цілісності, достовірності та актуальності даних комерційного обліку електричної енергії може бути реалізовано через впровадження низки організаційно-технічних засобів, зокрема, шляхом:

- забезпечення прозорості та об'єктивності формування даних комерційного обліку, зокрема, поетапне усунення заінтересованих сторін – виробників, трейдерів, електропостачальників і кінцевих споживачів від процедури формування даних комерційного обліку;

- повної автоматизації і формалізації процедури формування даних комерційного обліку засобами Smart-систем, що передбачає в цілком автоматичному режимі: вимірювання та облік електричної енергії, оброблення результатів вимірювань та визначення параметрів обліку, формування та підтримку цілісності БД обліку, забезпечення їхнього захисту та конфіденційності, безпечне передавання та дистанційне зчитування даних обліку, їхню візуалізацію в зручному для користувача вигляді, документування тощо;

- забезпечення гарантованого оперативного (своєчасного) недискримінаційного автоматизованого доступу всіх заінтересованих сторін до даних комерційного обліку, а також до первинних даних обліку та інших даних, необхідних, зокрема, з метою верифікації і валідації даних комерційного обліку та управління енерговикористанням, відповідно до регламентів ринку електричної енергії;

- побудови комплексної системи захисту та безпеки засобів і даних комерційного обліку на всіх рівнях розподіленої АСКОЕ ринку електричної енергії України. В основу концепції комплексного

забезпечення точності, повноти, цілісності, достовірності та актуальності даних комерційного обліку має бути покладено принцип простежуваності результатів обліку на всіх етапах їхнього формування (зокрема, вимірювання, оброблення, зберігання, передавання, агрегування, відображення, документування тощо);

• запровадження обов'язкової для всіх гравців ринку процедури багаторівневої верифікації і валідації даних обліку на всіх етапах їхнього формування. Головною умовою надійної верифікації та валідації даних обліку є забезпечення можливості їхнього визначення на підставі первинних даних обліку шляхом відповідного послідовного застосування на кожній стадії обробки належним чином визначених, узгоджених, формалізованих і затверджених у встановлений спосіб процедур.

Належне функціонування центральної інформаційно-комунікаційної платформи Datahub відповідно до Кодексу комерційного обліку [11] безпосередньо залежатиме від точності, повноти, цілісності, достовірності та актуальності даних обліку, зокрема необроблених, що має бути забезпечено комплексною системою захисту і безпеки даних обліку та реалізацією процедур їхньої надійної верифікації і валідації, забезпечення недискримінаційного оперативного (своєчасного) автоматизованого доступу заінтересованих сторін до даних обліку на всіх етапах їхнього формування. Це сприятиме ефективному управлінню попиту та прозорим розрахункам на ринку, що врешті решт має призвести до підвищення рівня ефективності енерговикористання та зменшення шкідливого впливу на довкілля.

Smart-лічильники електричної енергії дедалі стають головним засобом комунікацій електроенергетичних компаній та кінцевих споживачів. Сьогодні надважливого значення набувають функції Smart-систем з оперативного (своєчасного) інформування користувачів щодо поточних та інтегральних значень параметрів режимів електроспоживання, ринкових цін і тарифів на електричну енергію, показників (індикаторів) енергоефективності тощо. В умовах подальшої лібералізації ринку однією з найзатребуваніших функцій Smart-систем є прогнозування навантаження з метою забезпечення ефективного функціонування гравців ринку, зокрема споживачів, в сегментах ринку «на добу наперед», внутрішньодобовому та балансуєчому ринках.

Розгортання сучасних Smart-систем має бути предметом усесторонньої оцінки доцільності та аналізу очікуваних результатів. Рекомендації Європейської Комісії і Ради 2012/148/EU від 9 березня 2012 року [12] містять мінімальні вимоги щодо функціональності Smart-систем, а також методологію проведення аналізу довгострокових витрат та вигод (cost-benefit analysis /CBA/) під час розгортання Smart-систем, наголошуючи, що рішення щодо розгортання Smart-систем має бути предметом всебічної оцінки та аналізу, зокрема, місцевих (локальних) умов; економічної, енергетичної та інших видів ефективності; чутливості до зовнішніх та соціальних впливів тощо. Рішенню щодо широкого розгортання Smart-систем має передувати детальне вивчення набутого досвіду, зокрема, результатів впровадження пілотних проєктів та найкращих практик.

В рамках імплементації положень третього енергетичного пакету сучасні Smart-системи розглядаються не лише, як технічний засіб обліку електроенергії та контролю електроспоживання, а в першу чергу, як потужний інструмент адресного впливу на енергетичну поведінку кінцевих споживачів з метою зниження рівня енергоспоживання, підвищення ефективності використання електричної енергії та скорочення шкідливого впливу на довкілля. В цьому відношенні національним урядам, у співпраці з бізнесом, громадянськими асоціаціями та іншими заінтересованими сторонами пропонується виявляти і поширювати приклади ефективної практики застосування Smart-аплікацій щодо обліку електроенергії та вживати відповідних заходів з підвищення рівня суспільного усвідомлення, як невід'ємної умови для більш широких дій за підсумками впровадження Smart-технологій. Очікується, що створення набору рекомендованих функціональних вимог дозволить країнам синхронно досягати оптимального рівня економічної ефективності в своїх планах щодо розгортання Smart-систем [2].

Список використаної літератури

1. Про ринок електричної енергії [електронний ресурс] // Верховна Рада України; Закон від 13.04.2017 № 2019-VIII – Режим доступу: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/2019-19>.
2. Directive 2009/72/EU OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 13 July 2009 concerning common rules for the internal market in electricity and repealing Directive 2003/54/EC // Official Journal of the European Union, 14.08.2009. – L211/55-93.
3. Праховник А.В., Калинчик В.П., Волошко А.В., Коцарь О.В. Системы учета электроэнергии в условиях функционирования Smart Grid технологий // Энерг. та електрифікація, 2012. – № 1 – С. 51 – 58.
4. Концепція побудови автоматизованих систем обліку електроенергії в умовах енергоринку України // Затв. спільним наказом Мінпаливенерго, НКРЕ, Держкоенергозбереження, Держстандарту, Держбуду та Держкомпромполітики України від 17 квітня 2000 року № 32/28/28/276/75/54.
5. Загальні технічні вимоги до Автоматизованої системи комерційного обліку Оптового ринку електричної енергії України. Ч.І. Система збору, обробки та обміну даними комерційного обліку електричної енергії в Оптовому ринку. Додаток 7.4 до Договору між Членами Оптового ринку

електричної енергії України // Затв. Радою Оптового ринку електричної енергії України, протокол від 09 січня 2003 року № 7 (із змінами і доповненнями).

6. Загальні технічні вимоги до Автоматизованої системи комерційного обліку Оптового ринку електричної енергії України. Ч.ІІ. Система точного часу та підсистема забезпечення синхронності вимірювань Автоматизованої системи комерційного обліку Оптового ринку електроенергії України. Додаток 7.4 до Договору між Членами Оптового ринку електричної енергії // Затв. Радою Оптового ринку електричної енергії України, протокол від 24 вересня 2004 року № 12.

7. Автоматизовані системи комерційного обліку електроенергії суб'єктів ОРЕ. Загальні вимоги. Стандарт ОРЕ // Затв. Радою Оптового ринку електричної енергії України, протокол від 27 січня 2006 року № 15.

8. Коцар О.В., Расько Ю.О. Формування інформаційного забезпечення комерційних розрахунків в ОРЕ України // Енергетика: економіка, технології, екологія, 2014. – № 3 – С. 38 – 45.

9. Порядок перевірки даних, отриманих від автоматизованих систем комерційного обліку електроенергії суб'єктів ОРЕ // Погоджено постановами НКРЕ від 16.06.2011 р. № 1042 та від 17.11.2011 р. № 2195 – 9 с – [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://www.er.energy.gov.ua/doc.php?c=1228>.

10. Концепція Інформаційно-обчислювального комплексу Головного оператора Системи комерційного обліку Оптового ринку електроенергії України / Розроб.: А.В. Праховник – керівн. розроб., О.В. Коцар, Ю.О.Расько // Затв. ДП «Енергоринок» 10 листопада 2011 року – 68 с.

11. Кодекс комерційного обліку електричної енергії // Затверджено постановою НКРЕКП від 20.11.2017 р. – 66 с – [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://nerc.gov.ua/web/printable.php?news=6928&lang=UA>.

12. Commission Recommendation 2012/148/EU of 9 March 2012 on preparations for the roll-out of smart metering systems // Official Journal of the European Union, 13.03.2012. – L73/9-22.

О. Kotsar, Cand.Sc.(Eng.), Conf.Assoc.Prof., **ORCID** 0000-0002-7958-2335,
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kiev Polytechnic Institute”

SMART SYSTEMS FOR MEASURING, METERING AND ENERGY MANAGEMENT

The article summarizes the long way of creation, improvement and application in Soviet Union and Ukraine the automated systems for control, metering and load management. It has been proved that the main task of such automated systems is to manage of energy usage in order to increase the level of energy efficiency and prevent harmful effects on the environment. The direct relation of such automated systems with Smart Grid technologies is substantiated. The significant contribution of IEE Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute scientists in the processes of implementing the modern Smart Metering Systems, in particular, at the stages of formation and liberalization of Ukrainian electricity market is shown.

Key words: : automated system, metering data, electricity, electricity meter, metering, electricity market, Smart Grid, Smart Meter, Smart Metering System.

References

1. Pro rynek elektrychnoyi enerhiyi [elektronnyy resurs] // Verkhovna Rada Ukrayiny; Zakon vid 13.04.2017 № 2019-VIII – Rezhym dostupu: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/2019-19>.

2. Directive 2009/72/EU OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 13 July 2009 concerning common rules for the internal market in electricity and repealing Directive 2003/54/EC // Official Journal of the European Union, 14.08.2009. – L211/55-93.

3. Prakhovnyk A.V., Kalynchuk V.P., Voloshko A.V., Kotsar O.V. Systemy obliku elektroenerhiyi v umovakh funktsionuvannya Smart Grid tekhnolohiy // Enerh. ta elektryfikatsiya, 2012. –№ 1 – S.51 – 58.

4. Kontsepsiya pobudovy avtomatyzovanykh system obliku elektroenerhiyi v umovakh enerhorynku Ukrayiny // Zatv. spil'nym nakazom Minpalivenerho, NKRE, Derzhkommerhozberezhennya, Derzhstandartu, Derzhbudu ta Derzhkomprompolityky Ukrayiny vid 17 kvitnya 2000 roku № 32/28/28/276/75/54.

5. Zahal'ni tekhnichni vymohy do Avtomatyzovanoyi systemy komertsiyonoho obliku Optovoho rynku elektrychnoyi enerhiyi Ukrainy. CH.I. Systema zboru, obrobky ta obminu danymy komertsiyonoho obliku elektrychnoyi enerhiyi v Optovomu rynku. Dodatok 7.4 do Dohovoru mizh chlenamy Optovoho rynku elektrychnoyi enerhiyi Ukrainy // Zatv. Radoyu Optovoho rynku elektrychnoyi enerhiyi Ukrainy, protokol vid 09 sichnya 2003 roku № 7 (z zminamy ta dopovnennyamy).

6. Zahal'ni tekhnichni vymohy do Avtomatyzovanoyi systemy komertsiyonoho obliku Optovoho rynku elektrychnoyi enerhiyi Ukrainy. CH.II. Systema tochnoho chasu ta pidsystema zabezpechennya synkhronnosti vymiryuvan' Avtomatyzovanoyi systemy komertsiyonoho obliku Optovoho rynku elektroenerhiyi Ukrainy. Dodatok 7.4 do Dohovoru mizh Chlenamy Optovoho rynku elektrychnoyi enerhiyi // Zatv. Radoyu Optovoho rynku elektrychnoyi enerhiyi Ukrainy, protokol vid 24 veresnya 2004 roku № 12.

7. Avtomatyzovani systemy komertsiyonoho obliku elektroenerhiyi sub'yektiv ORE. Zahal'ni vymohy. Standart ORE // Zatv. Radoyu Optovoho rynku elektrychnoyi enerhiyi Ukrainy, protokol vid 27 sichnya 2006 roku № 15.

8. Kotsar O.V., Ras'ko YU.O. Formuvannya informatsiyonoho zabezpechennya komertsiyonikh rozrakhunkiv v ORE Ukrainy // Enerhetyka: ekonomika, tekhnolohiyi, ekolohiya, 2014. – № 3 – S. 38 – 45.

9. Poryadok perevirky danykh, otrymanykh vid avtomatyzovanykh system komertsiyonoho obliku elektroenerhiyi sub'yektiv ORE // Pohodzheno postanovamy NKRE vid 16.06.2011 r. № 1042 ta vid 17.11.2011 r. № 2195 – 9 s - [Elektronnyy resurs] – Rezhym dostupu: <http://www.er.energy.gov.ua/doc.php?c=1228>.

10. Kontseptsiya Informatsiyno-obchyslyval'noho kompleksu Holovnoho operatora Systemy komertsiyonoho obliku Optovoho rynku elektroenerhiyi Ukrainy / Rozrobka: A.V. Prakhovnyk – kerivn. rozrobka., O.V. Kotsar, YU.O.Ras'ko // Zatv. DP «Enerhorynok» 10 lystopada 2011 roku – 68 s.

11. Kodeks komertsiyonoho obliku elektrychnoyi enerhiyi // Zatverdzheno postanovoyu NKREKP vid 20.11.2017 r. – 66 s – [Elektronnyy resurs] – Rezhym dostupu: <http://nerc.gov.ua/web/printable.php?news=6928&lang=UA>.

12. Commission Recommendation 2012/148/EU of 9 March 2012 on preparations for the roll-out of smart metering systems // Official Journal of the European Union, 13.03.2012. – L73/9-22.

О.В. Коцарь, канд. техн. наук, доц. **ORCID** 0000-0002-7958-2335

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

SMART-СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ, УЧЕТА И УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГОИСПОЛЬЗОВАНИЕМ

В статье кратко освещен длительный путь развития АСКУЭ, в том числе процессы их создания, совершенствования и применения для контроля, учета и управления режимами электропотребления. Доказано, что главной задачей АСКУЭ является управление энергопотреблением с целью повышения уровня энергоэффективности и предотвращения вредного воздействия на окружающую среду. Обоснована непосредственная связь АСКУЭ со Smart Grid-технологиям. Показан весомый вклад специалистов Института энергосбережения и энергоменеджмента КПИ им. Игоря Сикорского в процессы внедрения современных Smart-систем измерения, учета и управления энергоиспользованием, в частности, на этапах становления и либерализации рынка электрической энергии Украины.

Ключевые слова: АСКУЭ, данные учета, электроэнергия, счетчик электроэнергии, учет, рынок электрической энергии, Smart Grid, Smart Meter, Smart Metering System.

Надійшла 17.04.2018

Received 17.04.2018

ЛІБЕРАЛІЗОВАНІ РИНКИ ЕНЕРГІЇ LIBERALIZED ENERGY MARKET

УДК 644.1

В.І. Дешко, д-р. техн. наук, проф. ORCID 0000-0002-8218-3933

Д.С. Карпенко, асп. ORCID 0000-0002-8022-9782

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИЙ АНАЛІЗ СТВОРЕННЯ РИНКУ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ В УКРАЇНІ

Описані особливості ринку теплової енергії та їх вплив на його ефективність. Визначені технічні засоби ринку теплової енергії та їх розподіл на чотири зони: зона виробників, зона теплопостачальної організації, зона споживачів та зона державного контролю. Описані складові капітальних затрат на створення ринку теплової енергії. Описана суть моделі ринку теплової енергії та методика розрахунку фінансових показників виробників теплової енергії. Формалізовано поняття ефективності ринку теплової енергії та терміну його окупності. Розроблено проект ринку теплової енергії в місті Ірпінь (Україна, Київська область) в авторському програмному забезпеченні «Thermal Energy Market». Визначені основні технічні характеристики системи теплопостачання в Ірпіні при умовах монополії та при умовах конкуренції. На базі моделі виконано розрахунок ефективності ринку теплової енергії, оптимального коефіцієнту частки ринку, та його простого і дисконтованого термінів окупності в системі теплопостачання з одним основним виробником теплової енергії та сьома незалежними виробниками, які використовують власні технологічні процеси та джерела енергії.

Ключові слова: ринок теплової енергії, техніко-економічний аналіз, джерела енергії, ефективність, термін окупності, система теплопостачання.

Вступ

Процес створення ринку теплової енергії (РТЕ) в Україні не можна розглядати тільки з точки зору вигод, які утворюються при реалізації конкурентного середовища в системі теплопостачання. РТЕ є локальним ринком, який обмежується територією міста, і не несе вплив на ринки, які знаходяться в інших містах України. Даний аспект описує необхідність передачі відповідальності за впровадження ринку від державних органів влади до місцевих органів самоврядування, що є частиною політики децентралізації в Україні [1].

Ефективність того, чи іншого РТЕ визначається наступними показниками [2]:

- доступність і вартість місцевих ресурсів для використання у виробництві теплової енергії;
- екологічні та економічні стимули використання тих чи інших ресурсів для виробництва теплової енергії;
- рівень успішності ведення підприємницької діяльності в сфері теплопостачання, що є вигодою для самого виробника;
- сприяння органів місцевого самоврядування до розвитку і функціонування РТЕ;
- технічних стан теплових мереж;
- ефективність процесу операторського керування РТЕ;
- рівень технічної та економічної ефективності до створення РТЕ;
- правильність технічних рішень на етапі впровадження РТЕ;

Всі вищенаведені показники в сумі і дають ту вигоду, яка утворюється в наслідок функціонування РТЕ. Ця вигода відображається перш за все у зниженні тарифу на теплову енергію для кінцевого споживача, що і є однією із цілей впровадження РТЕ.

Але, є дуже важливим розглядати РТЕ з точки зору єдиного цілого, в якості мікроекономічної одиниці. Це означає, що результатом створення ринку є капітальні витрати для приведення його в стан функціонування, а результатом роботи ринку є експлуатаційні витрати та отримання прибутку. При цьому, прибуток розглядається саме як рівень ефективності РТЕ, що є сумою вигод незалежних виробників і споживачів [3]. Також, ключовим показником має виступати термін окупності РТЕ, який і є визначальним в частині прийняття рішення щодо створення ринку в процесі його проектування.

Мета і завдання

Метою даної статті є для визначення методики прийняття рішення з необхідності впровадження РТЕ, та приблизна оцінка терміну окупності загального РТЕ в межах України, як макроекономічного показника.

Для досягнення даної мети необхідно вирішити наступні завдання:

- визначення переліку технічних засобів для створення РТЕ;
- визначення методики визначення терміну окупності РТЕ, та величини терміну окупності;
- визначення капітальних затрат при створенні РТЕ на основі переліку необхідних для цього технічних засобів.
- розрахунок терміну окупності РТЕ на основі реального об'єкту.

Визначення переліку технічних засобів для створення РТЕ

Для визначення складових створення РТЕ в частині технічних засобів, необхідно поділити на чотири основні зони відповідальності відповідно до структури системи тепlopостачання:

1. Зона виробників, яка характеризується об'єктами теплогенерації та тепломережами на межі фізичного розділення теплоносіїв виробника та тепlopостачальної організації. На сьогодні, існує значна кількість технологій по виробництву теплової енергії. В залежності від кон'юнктури цін на ринку енергоносіїв та способів її використання, та чи інша технологія може превалювати. В табл. 1 наведено основні види ресурсів для виробництва теплової та електричної енергії.

Таблиця 1 – Основні види ресурсів для виробництва теплової та електричної енергії

| Тип ресурсу | Технологія |
|--|--------------------------------------|
| Сонячна енергія | Геліосистеми |
| | Фотовольтаїка |
| Енергія вітру | Вітрогенератори |
| Біомаса | Спалювання |
| | Газифікація |
| | Переетерифікація |
| Енергія геотермальних вод та земних надр | Теплообмін з навколишнім середовищем |
| Енергія гідроресурсів | Електрогенератори |
| Викопні палива | Спалювання |
| | Газифікація |
| Атомна енергія | Ядерні реакції поділу та синтезу |

2. Зона тепlopостачальної організації, яка характеризується магістральними та розподільчими тепловими мережами на межі фізичного розділення теплоносіїв як зі сторони виробників, так і зі сторони споживачів. Також, сюди слід віднести засоби операторського контролю та керування процесом тепlopостачання.

3. Зона споживачів, яка характеризується об'єктами споживання теплової енергії та тепломережами на межі фізичного розділення теплоносіїв споживача та тепlopостачальної організації.

4. Зона державного контролю за процесами функціонування РТЕ. Ця зона має відношення до організації РТЕ з точки зору проведення аукціонів з купівлі-продажу теплової енергії. Передбачається, що на базі РТЕ буде створений орган влади, як складова частина органів місцевого самоврядування, який матиме функції юридичного регулювання процесу функціонування РТЕ взагалі.

Виходячи з цієї класифікації постає важливе питання про джерела фінансування технічних засобів, які закріплюються за одними з чотирьох зон відповідальності наведених вище. Варіантів рішення цього питання може бути декілька, тому, оскільки, результат розрахунків не залежить від джерел фінансування, даний аспект не розглядається в даній статті.

Під технічними засобами для створення РТЕ розуміються такі засоби, без наявності яких функціонування ринку теплової енергії неможливо.

Відповідно, до наведеної вище класифікації зон відповідальності наведено перелік технічних засобів для створення і функціонування РТЕ:

1. Зона виробників:
 - теплова мережа до місця розмежування теплоносіїв виробника та тепlopостачальної організації, якщо це необхідно, C_{TM}^B ;
 - поверхневий теплообмінний апарат, $C_{ПТ}^B$;
 - лічильник теплової енергії, $C_{ЛТЕ}^B$;
 - засоби автоматизації для регулювання потужності теплогенерації, C_A^B ;

- Сума капітальних витрат на створення РТЕ в зоні виробника складе, грн.:

$$C_{\Sigma}^B = C_{TM}^B + C_{ПТ}^B + C_{ЛТЕ}^B + C_A^B \quad (1)$$

- 2. Зона теплостачальної організації:

- магістральні та розподільчі теплові мережі для заміни або реновації тих, що мають незадовільний технічний стан, та для прокладання нових для збільшення масштабу РТЕ, C_{TM}^{TO} ;

- центральні теплові пункти (ЦТП) для розділення контурів магістральних та розподільчих мереж, $C_{ЦТП}^{TO}$;

- засоби автоматизації та диспетчеризації для контролю та управління регулюванням потужності перетоків теплової енергії в тепловій мережі, C_{AD}^{TO} ;

- Сума капітальних витрат на створення РТЕ в зоні теплостачальної організації складе, грн.:

$$C_{\Sigma}^{TO} = C_{TM}^{TO} + C_{ЦТП}^{TO} + C_{AD}^{TO} \quad (2)$$

- Зона споживачів:

- теплова мережа до місця розмежування теплоносіїв споживачів та теплостачальної організації, якщо це необхідно, C_{TM}^C ;

- індивідуальний тепловий пункт (ІТП), що включає в себе: поверхневий теплообмінний апарат, лічильник теплової енергії, засоби автоматизації для регулювання потужності споживання, $C_{ІТП}^C$.

- Сума капітальних витрат на створення РТЕ в зоні споживача складе, грн.:

$$C_{\Sigma}^C = C_{TM}^C + C_{ІТП}^C \quad (3)$$

3. Зона державного контролю за процесами функціонування РТЕ передбачає затрати на створення органів державної влади для впровадження і контролю РТЕ в межах міста.

Отже, загальна сума капітальних затрат РТЕ складе, грн.:

$$C_{\Sigma}^{PTE} = C_{\Sigma}^B + C_{\Sigma}^{TO} + C_{\Sigma}^C + C_{\Sigma}^{DO} \quad (4)$$

де,

C_{Σ}^{DO} – сума витрат на створення органу регулювання функціонування РТЕ, грн.

Визначення капітальних затрат в конкретному місті, де планується створення РТЕ може проводитись саме по вищенаведеній схемі, але необхідно розуміти, що в силу різних вихідних умов, величина капітальних витрат може відрізнятись.

Модель ринку теплової енергії

Модель РТЕ є статичною, і не описує кон'юктурні зміни на ринку на протязі його роботи. Статті витрати кожного з виробників визначенні протягом всього часу і є незмінними. Статична модель показує принципові тенденції на ринку теплової енергії, і не враховує динамічні, або непередбачувані процеси, які можуть виникати. Такими процесами можуть бути:

1. Неможливість постачання теплової енергії виробником який виграв аукціон із-за технічних неполадок.
2. Зміна цін на ресурси в часі, які закладаються у витрати виробників.
3. Зміна правил роботи аукціону або законодавчих обмежень на ринку.
4. Нестабільність погодних умов.

На рис. 1 представлена принципова схема складових цільової функції моделі ринку теплової енергії.

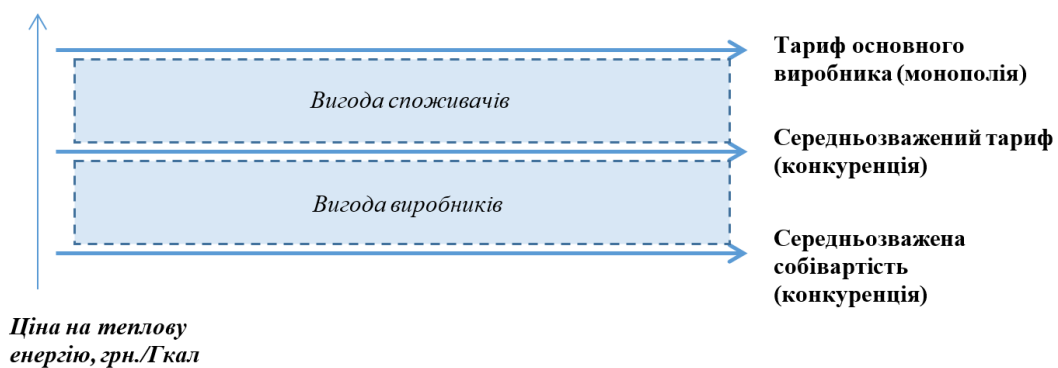


Рисунок 1 – Принципова схема складових цільової функції моделі ринку теплової енергії

Для кожного з об'єктів теплогенерації проводиться розрахунок функцій повних витрат та прогнозований тариф з врахуванням норми прибутку кожного з постачальників теплової енергії [4].

Функція повних витрат для кожного об'єкту теплогенерації представлена у наступному виді:

$$TC = (A_1 + A_2 + A_3) \times Q + (B_1 + B_2 + B_3 + B_4), \quad (5)$$

де:

TC – повні витрати на виробництво теплової енергії за рік, грн.;

A₁ – витрати на енергоресурс для виробництва 1 Гкал теплової енергії, грн./Гкал;

A₂ – витрати на доставку енергоресурсу для виробництва 1 Гкал теплової енергії, грн./Гкал;

A₃ – витрати на електроенергію для виробництва 1 Гкал теплової енергії, грн./Гкал;

B₁ – постійні витрати на заробітну плату робочого персоналу на виробництво теплової енергії за рік, грн.;

B₂ – постійні витрати на інші витрати на виробництво теплової енергії за рік, грн.;

B₃ – постійні витрати на амортизацію на виробництво теплової енергії за рік, грн.;

B₄ – постійні витрати на адміністрацію на виробництво теплової енергії за рік, грн.;

Q – кількість виробленої теплової енергії за рік, Гкал.

В даній моделі локального ринку теплової енергії в якості обмеження вводиться поняття частки ринку, тобто максимальна межа кількості теплової енергії, яку може відпустити кожен із виробників за кожен місяць. Частка ринку для і-того виробника (крім основного) визначається коефіцієнтом долі ринку:

$$Q_{mij}^d = Q_{спj} \cdot q, \quad (6)$$

де:

Q_{mij}^d – доля ринку для і-того виробника j-того місяця, Гкал,

Q_{спj} – попит на теплову енергію j-того місяця, Гкал,

q – коефіцієнт частки ринку.

Для формування матриці потенціалу виробництва теплової енергії на ринку використовуються наступні умови:

Якщо $Q_{mi}^n < Q_{mij}^d$:

$$Q_{mij}^3 = Q_{mi}^n; \quad (7)$$

якщо $Q_{mi}^n \geq Q_{mij}^d$:

$$Q_{mij}^3 = Q_{mij}^d; \quad (8)$$

де:

Q_{mij}³ – заявочна кількість теплової енергії для і-того виробника j-того місяця.

Виходячи с кількості виробників та кількості місяців заповнюється матриця потенціалу виробництва теплової енергії на ринку.

Отже, кожен виробник, маючи функцію повних витрат та рівень планового прибутку, виходячи з ринкових умов та можливої кількості проданої теплової енергії, розраховує прогнозований тариф на відпуск теплової енергії, та подає в якості заявки на аукціон. Прогнозований тариф на теплову енергію для кожного виробника складе:

$$T_i = \frac{A_i \cdot \sum_{n=1}^{j=1} Q_{mij}^3 + B_i + P}{\sum_{n=1}^{j=1} Q_{mij}^3} \quad (9)$$

де:

T_i – прогнозований тариф на теплову енергію і-того виробника, грн./Гкал,

A_i – сума змінних витрат і-того виробника, грн./Гкал,

B_i – сума постійних витрат і-того виробника, грн./Гкал.

На основі поданих заявок виробників, в яких зазначаються такі параметри як T_i та Q_{mij}³, проводиться аукціон, де визначаються переможці, які по поданим тарифам і об'ємам будуть продавати теплову енергію в і-тому місяці.

Заявки сортуються за ціновими пропозиціями в напрямку збільшення. Сума заявок переможців для j-того місяця визначається умовою:

$$\sum_{n=1}^{i=1} Q_{mij}^3 = Q_{спj} \quad (10)$$

де:

n – номер останнього виробника-переможця.

Якщо заявочний об'єм теплової енергії останнього виробника-переможця повністю не покриває попит j-того місяця, то враховується лише частина заявочного об'єму:

$$Q_{mij}^3 = Q_{спj} - \sum_{n=1}^{i=1} Q_{mij}^3 \quad (11)$$

де:

$Q_{m,n,j}^3$ – частина заявочного об'єму теплової енергії останнього виробника-переможця яка покриває попит j -того місяця.

В якості результату проведеного аукціону формується матриця виробників-переможців аукціону.

На основі матриці виробників-переможців аукціону розраховується сумарна вартість спожитої теплової енергії в j -тому місяці на ринку:

$$C_{спj} = \sum_n^{i=1} (Q_{m,i,j}^3 \cdot T_i) \quad (12)$$

де:

$C_{спj}$ – сумарна вартість спожитої теплової енергії в j -тому місяці, грн.

Середньозважений тариф на відпуск теплової енергії в j -тому місяці:

$$T_j^{с.зв} = \frac{C_{спj}}{Q_{спj}} \quad (13)$$

Після проведення аукціонів за кожен місяць опалювального сезону, кожен з виробників матиме свій фінансовий результат, який буде відображати успішність роботи даного виробника на ринку теплової енергії. Основними показниками, які характеризують успішність роботи підприємства на ринку теплової енергії є:

- загальний виторг i -того виробника,
- загальні витрати i -того виробника,
- загальний прибуток i -того виробника,
- різниця планового прибутку і фактичного прибутку i -того виробника
- рентабельність i -того виробника.

Розглядаючи ситуацію в Україні в частині систем тепlopостачання, необхідно прийняти до уваги, що майже в усіх великих містах України існують комунальні підприємства, які виконують функцію тепlopостачальника і фактично є монополістами. Створюючи ринкові відносини в системах тепlopостачання таких міст, природнім є те, що попит, який покривало комунальне підприємство буде знижуватись, а тому фінансова успішність цих підприємств також буде зазнавати зниження. Також можлива ситуація, коли комунальне підприємство буде зазнавати збитків.

Оскільки, комунальні підприємства є основними постачальниками теплової енергії в містах, необхідно запровадити механізм стимулювання цих підприємств у випадку виникнення збитків за рахунок постійних витрат.

Є декілька способів забезпечення цієї умови:

1. Повна компенсація збитків.
2. Часткова компенсація збитків із постійним відсотком компенсації
3. Часткова компенсація збитків із стимулюючим відсотком компенсації.

Для простоти, в даній моделі обрано перший варіант компенсації збитків, розподіляючи цю величину відносно річного об'єму відпущеної теплової енергії на ринку.

Величина річного середньозваженого тарифу на теплову енергію з врахуванням компенсації збитків основному виробнику складає:

$$T^{с.зв} = \frac{\sum_n^{i=1} C_{спi} + U_1}{\sum_n^{i=1} Q_{спi}} \quad (14)$$

де:

U_1 - величина збитків основного виробника за рік, грн.

Вигоду від впровадження ринку теплової енергії необхідно розглядати з точки зору різниці в вартості спожитої теплової енергії та середньозважених тарифах на теплову енергію при його функціонуванні та відсутності. З іншої сторони розглядається сумарна величина прибутків виробників. Сума цих двох показників є цільовою функцією моделі ринку теплової енергії.

Основною метою моделювання є визначення оптимального коефіцієнту частки ринку при визначеній кількості виробників теплової енергії та кількості спожитої кількості теплової енергії за рік споживачами на ринку.

Вигоду від впровадження ринку теплової енергії необхідно розглядати з точки зору різниці в вартості спожитої теплової енергії та середньозважених тарифах на теплову енергію при його функціонуванні та відсутності. Саме ця різниця виступає цільовою функцією для оптимізації роботи ринку теплової енергії, де обмеженням виступає коефіцієнт частки ринку.

При відсутності ринку теплової енергії прогнозований тариф для основного виробника складає:

$$T_1 = \frac{A_1 \cdot \sum_n^{i=1} Q_{спi} + B_1 + P}{\sum_n^{i=1} Q_{спi}} \quad (15)$$

Різниця в тарифах на теплову енергію при функціонуванні та відсутності ринку теплової енергії, грн/Гкал:

$$\Delta T = T_1 - T^{с.зв} \quad (16)$$

Вигода від впровадження ринку теплової енергії із врахуванням компенсації збитків основного виробника, грн:

$$V = \Delta T \cdot \sum_n^{j=1} Q_{сп} \quad (17)$$

Сума прибутків незалежних виробників, грн:

$$P = \sum_n^{i=1} TP_i - U_1 \quad (18)$$

Визначення терміну окупності PTE

Для розрахунку терміну окупності PTE, необхідно знати основні дві величини: сума капітальних витрат на створення PTE - C_{Σ}^{PTE} , та загальну вигоду від створення PTE при його функціонуванні за один календарний рік. Таким показником виступає ефективність ринку теплової енергії [3]. Даний показник є сумою вигоди від впровадження ринку теплової енергії із врахуванням компенсації збитків основного виробника (V) і суми прибутків незалежних виробників (P), грн:

$$E = V + P \quad (19)$$

Виходячи з цього, дисконтована вартість грошових потоків для PTE складе, грн:

$$NPV_r = -C_{\Sigma}^{PTE} + \sum_{t=1}^n \frac{(E)}{(1 + \frac{i}{100})^t}, \quad (20)$$

де:

i – ставка дисконтування, яка є функцією від вартості альтернативного вкладання коштів, рівня інфляції за обраний період та ін., %;

t – поточний період (рік);

n – розрахунковий період (років).

Дисконтований термін окупності T визначається за формулою:

$$T = (r - 1) + \frac{NPV_{r-1}}{NPV_r - NPV_{r-1}}, \text{ рік}, \quad (21)$$

де: r – рік, в якому $NPV > 0$.

Простий термін окупності складе:

$$T^{пр} = \frac{C_{\Sigma}^{PTE}}{E}, \text{ рік}, \quad (22)$$

Оцінка терміну окупності PTE при його створенні в м. Ірпінь

Для розрахунку терміну окупності PTE міста Ірпінь було використано авторське програмне забезпечення «Thermal Energy Market» [5]. В першу чергу, необхідно визначити загальну вигоду від створення PTE при його функціонуванні за один календарний рік. Оскільки, суть моделі полягає у визначенні різниці економічних результатів функціонування системи тепlopостачання міста при монополії та конкуренції, необхідно побудувати існуючу систему тепlopостачання міста.

Аналізуючи побудовану схему можна визначити, що на даний момент існує 4 великі не пов'язані між собою системи теплових мереж. Загальна довжина теплових мереж існуючої системи за результатами розрахунків складає приблизно 19 км. Основні технічні характеристики існуючої системи представлені в табл. 2.

Таблиця 2 – Основні технічні характеристики існуючої системи тепlopостачання в місті Ірпінь

| Характеристика системи тепlopостачання | Величина |
|--|-------------|
| Загальна довжина теплових мереж | 18,896 км |
| Споживання теплової енергії в системі тепlopостачання за рік | 42 137 Гкал |
| Виробництво теплової енергії джерелами теплогенерації за рік | 48 065 Гкал |
| Втрати теплової енергії в мережах за рік | 5 928 Гкал |
| Відносні втрати в теплових мережах | 12,33 % |

В системі тепlopостачання м. Ірпінь відсутнє централізоване ГВП. Графік споживання та виробництва теплової енергії на опалення по місяцям в місті Ірпінь представлено на рисунку 2.

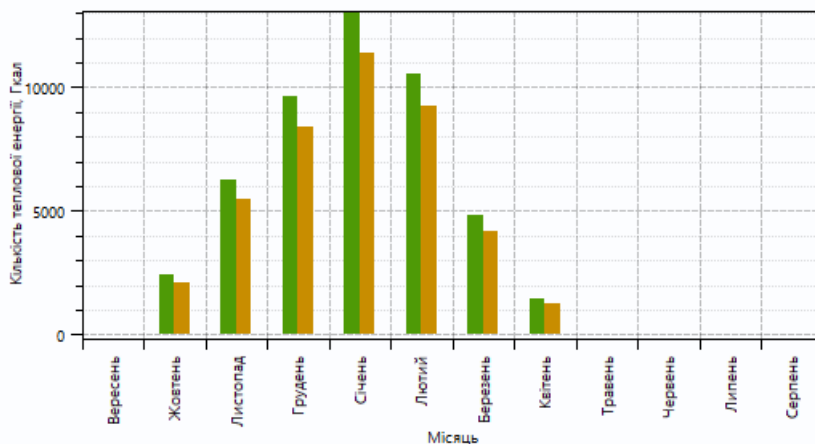


Рисунок 2 – Графік споживання та виробництва теплової енергії на опалення по місяцям в місті Ірпінь (зелений – величина виробництва, помаранчевий – величина споживання)

На основі визначеного стану системи тепlopостачання м. Ірпінь, спроектовано пов’язану систему теплових мереж і виробників (незалежних та основного). Нова спроектована система утворює основу для функціонування ринку теплової енергії в місті [6, 7].

Основні технічні характеристики системи для ринку теплової енергії представлені в табл. 3.

Таблиця 3 – Основні технічні характеристики системи тепlopостачання в місті Ірпінь при функціонуванні РТЕ

| Характеристика системи тепlopостачання | Величина |
|--|-------------|
| Загальна довжина теплових мереж | 33,661 км |
| Довжина новозбудованих теплових мереж | 14,765 км |
| Споживання теплової енергії в системі тепlopостачання за рік | 42 137 Гкал |
| Виробництво теплової енергії джерелами теплогенерації за рік | 53 107 Гкал |
| Втрати теплової енергії в мережах за рік | 10970 Гкал |
| Відносні втрати в теплових мережах | 20,66 % |

При створенні системи для ринку теплової енергії, за рахунок будівництва нових теплових мереж бачимо збільшення абсолютних та відносних втрат майже вдвічі відносно монопольного становища в місті.

Графік споживання та виробництва теплової енергії на опалення по місяцям в місті Ірпінь при функціонуванні РТЕ представлено на рисунку 3.

В моделі визначено 7 незалежних виробників, які підключають свої об’єкти теплогенерації до об’єднаної теплової мережі міста [8]. Кожен з виробників має власні ресурси, на основі яких впроваджує свою підприємницьку діяльність з виробництва теплової енергії. Кожен з виробників визначає свої капітальні витрати на будівництво об’єктів та експлуатаційні витрати на виробництво теплової енергії. Виходячи з цих показників, виробник прогнозує свій прибуток за сезон, враховуючи свою допустиму норму прибутку. Так складається прогнозований тариф, виходячи з кількості теплової енергії, яку виробник може продати за рік, яка в свою чергу визначається в залежності від коефіцієнту частки ринку, яка існує на ринку теплової енергії в даний час. Оптимальний коефіцієнт частки ринку визначений за допомогою моделі.

Залежність абсолютної ефективності ринку теплової енергії від коефіцієнта частки ринку представлений на рис. 4.

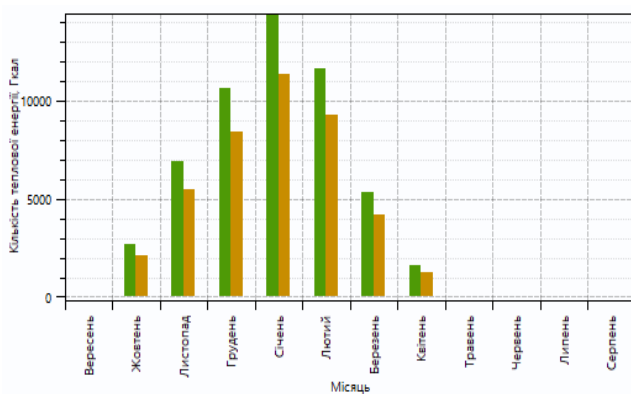


Рисунок 3 – Графік споживання та виробництва теплової енергії на опалення по місяцям в місті Ірпінь при функціонуванні РТЕ (зелений – величина виробництва, помаранчевий – величина споживання)

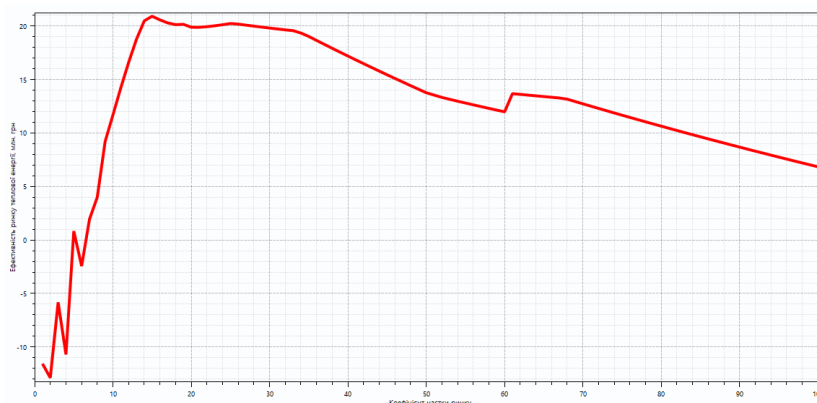


Рисунок 4 – Графік залежності абсолютної ефективності ринку теплової енергії від коефіцієнта частки ринку

Отже, оптимальний коефіцієнт частки ринку на основі проведених розрахунків становить 0,15. Характеристика виробників теплової енергії при функціонуванні РТЕ при коефіцієнті частки ринку 0,15 представлена в табл. 4.

Таблиця 4 – Характеристик виробників теплової енергії на РТЕ в м. Ірпінь

| Назва виробника | Кількість об'єктів теплогенерації | Вид енергетичного ресурсу | Прогнозований тариф, грн./Гкал | Прогнозована норма прибутку, % | Ліміт теплової енергії за рік, Гкал |
|--------------------|-----------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|
| Основний виробник | 23 | Природний газ | 1608,77 | 3 | 53107 |
| Незал. виробник №1 | 3 | Біомаса (дрова тріска) | 1124,94 | 35 | 7927 |
| Незал. виробник №2 | 2 | Біомаса (пелети соломи) | 1356,54 | 32 | 7927 |
| Незал. виробник №3 | 2 | Біомаса (дрова) | 1281,12 | 40 | 7927 |
| Незал. виробник №4 | 3 | Біомаса (пелети соняшника) | 1366,58 | 36 | 7927 |
| Незал. виробник №5 | 1 | Біомаса (пелети деревини) | 1006,5 | 33 | 7927 |
| Незал. виробник №6 | 2 | Торф (пелети) | 1257,41 | 34 | 7927 |
| Незал. виробник №7 | 2 | Енергія навколишнього середовища | 886,73 | 30 | 7927 |

На основі поданих заявок виробників, які містять кількість теплової енергії та ціну на неї, за яку виробники готові її продати проводиться аукціон, де визначаються виробники які будуть виробляти і продавати теплову енергію за вказаною в заявці ціною. Результати проведення аукціону представлені в табл. 5 та 6.

Таблиця 5 – Результати проведення аукціону на ринку теплової енергії, Гкал (за опалювальний сезон)

| № | Назва виробника | Жовтень | Листопад | Грудень | Січень | Лютий | Березень | Квітень | Сума |
|---|-------------------|---------|----------|---------|--------|--------|----------|---------|------|
| 1 | Виробник №7 | 398,3 | 1035,6 | 1593,2 | 2111,5 | 1752,5 | 796,6 | 239,0 | 7927 |
| 2 | Виробник №5 | 398,3 | 1035,6 | 1593,2 | 2015,5 | 1752,5 | 796,6 | 239,0 | 7927 |
| 3 | Виробник №1 | 398,3 | 1035,6 | 1593,2 | 2063,5 | 1752,5 | 796,6 | 239,0 | 7927 |
| 4 | Виробник №6 | 398,3 | 1035,6 | 1593,2 | 2111,5 | 1752,5 | 796,6 | 239,0 | 7927 |
| 5 | Виробник №3 | 398,3 | 1035,6 | 1593,2 | 2111,5 | 1752,5 | 796,6 | 239,0 | 7927 |
| 6 | Виробник №2 | 398,3 | 1035,6 | 1593,2 | 2111,5 | 1752,5 | 796,6 | 239,0 | 7927 |
| 7 | Виробник №4 | 265,5 | 690,4 | 1062,1 | 1814,1 | 1168,4 | 531,1 | 159,3 | 5691 |
| 8 | Основний виробник | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Таблиця 6 – Фінансові результати проведення аукціону на ринку теплової енергії (за опалювальний сезон)

| № | Назва виробника | Виторг, грн. | Витрати, грн | Прибуток, грн | Відхилення, грн | Рентабельність, % |
|---|-------------------|--------------|--------------|---------------|-----------------|-------------------|
| 1 | Виробник №7 | 7 028 836 | 3 141 885 | 3 886 950 | 0 | 55,3 |
| 2 | Виробник №5 | 7 881 634 | 6 828 732 | 1 052 902 | 0 | 13,36 |
| 3 | Виробник №1 | 8 863 099 | 6 708 699 | 2 154 400 | 0 | 24,31 |
| 4 | Виробник №6 | 9 967 122 | 8 718 730 | 1 248 392 | 0 | 12,53 |
| 5 | Виробник №3 | 10 155 112 | 9 201 221 | 954 891 | 0 | 9,39 |
| 6 | Виробник №2 | 10 752 899 | 8 655 560 | 2 097 339 | 0 | 19,5 |
| 7 | Виробник №4 | 7 777 272 | 6 936 985 | 840 287 | -1 370 651 | 10,8 |
| 8 | Основний виробник | 0 | 6 222 469 | - 6 222 469 | -6 344 735 | 0 |

За результатами проведеного аукціону маємо результати з точки зору фінансових показників кожного з виробників, а також сумарні величини, які характеризують ефективність ринку теплової енергії. В табл. 7 представлені результати роботи ринку теплової енергії в місті Ірпінь.

Таблиця 7 – Прогнозовані результати роботи РТЕ в м. Ірпінь (за опалювальний сезон)

| | При функціонуванні РТЕ без компенсації | При функціонуванні РТЕ з компенсацією | При відсутності РТЕ |
|--|--|---------------------------------------|---------------------|
| Вартість спожитої теплової енергії, грн. | 62 425 801 | 68 648 270 | 77 325 682 |
| Середній тариф для споживача, грн/Гкал | 1175,47 | 1292,63 | 1608,77 |
| Абсолютна вигода для споживачів, грн | 14 899 880 | 8 677 411 | - |
| Абсолютна вигода для виробників, грн | 6 011 645 | 12 234 161 | - |
| Абсолютна ефективність РТЕ | 20 911 573 | 20 911 573 | - |
| Відносна вигода для споживачів, % | 19,27 | 11,22 | - |
| Відносна вигода для виробників, % | 7,77 | 15,82 | - |
| Відносна ефективність РТЕ, % | 27,04 | 27,04 | - |

Згідно формули (4) розраховано суму капітальних затрат на створення ринку теплової енергії в місті Ірпінь згідно існуючих технічних засобів на даний момент:

$$C_{\Sigma}^{\text{РТЕ}} = C_{\Sigma}^{\text{В}} + C_{\Sigma}^{\text{ТО}} + C_{\Sigma}^{\text{С}} + C_{\Sigma}^{\text{ДО}} = 20 + 90 + 20 + 10 = 140 \text{ млн. грн}$$

За визначеними результатами функціонування РТЕ в м. Ірпінь визначено простий термін окупності за формулою (20):

$$T^{\text{пр}} = \frac{C_{\Sigma}^{\text{РТЕ}}}{E} = \frac{140\,000\,000}{20\,911\,573} \approx 6,7 \text{ років}$$

Розраховано дисконтований термін окупності РТЕ в місті Ірпінь за формулами (18) та (19) при умові $i = 14\%$. Результати розрахунку для кожного с років представлено в табл. 8. Графік залежності NPV від року представлений на рис. 5.

Таблиця 8 – Розрахунок дисконтованого терміну окупності РТЕ в м. Ірпінь

| Рік | NPV (i), млн. грн. |
|-----|--------------------|
| 0 | -140,00 |
| 1 | -119,09 |
| 2 | -100,74 |
| 3 | -84,65 |
| 4 | -70,54 |
| 5 | -58,16 |
| 6 | -47,30 |
| 7 | -37,77 |
| 8 | -29,41 |
| 9 | -22,08 |
| 10 | -15,65 |
| 11 | -10,01 |
| 12 | -5,06 |
| 13 | -0,72 |
| 14 | 3,08 |

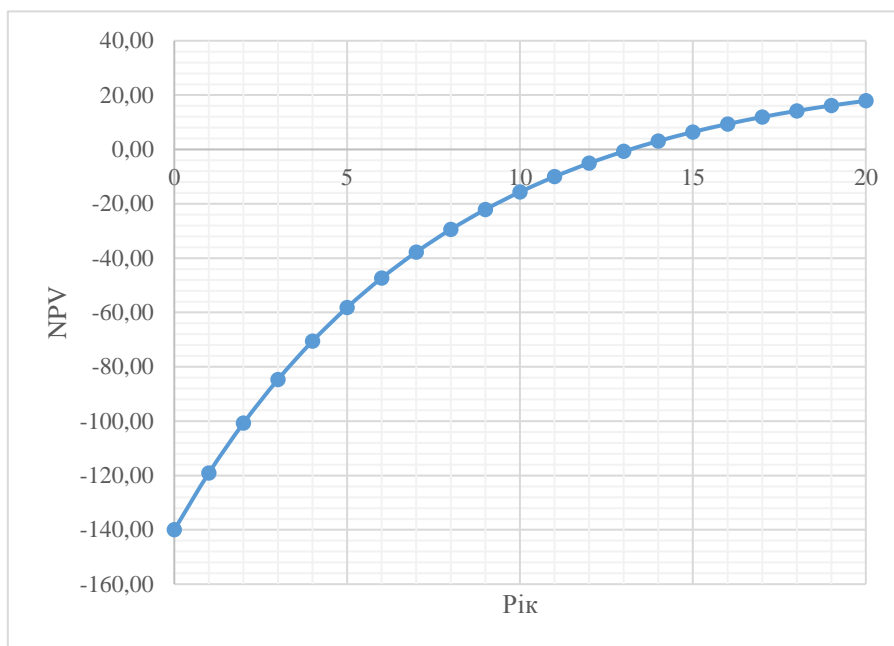


Рисунок 5 – Графік залежності NPV від року

Отже, дисконтований термін окупності РТЕ в м. Ірпінь становить:

$$T = (14 - 1) + \frac{0,72}{3,08 - (-0,72)} \approx 13,2 \text{ років}$$

Висновки

В даній роботі був визначений перелік необхідних технічних засобів для створення ринку теплової енергії. Без забезпечення ринку теплової енергії цими засобами, його функціонування неможливе, тому наведена класифікація щодо зон відповідальності при створенні РТЕ: зона виробників, зона теплостачальної організації, зона споживачів, зона органів державної влади. Наведено розрахунок капітальних витрат відповідно до класифікації зон відповідальності при створенні РТЕ.

У цій роботі проведено аналіз умов функціонування ринку теплової енергії для міста Ірпінь. За результатами моделювання взаємодії 8 виробників, які мають різні технології виробництва теплової енергії на ринку об'ємом споживання в 42 тис. Гкал, оптимізовано коефіцієнт частки ринку згідно визначених умов на ринку теплової енергії, який дорівнює 0,15.

В програмному забезпеченні «Thermal Energy Market» визначено, що при оптимальному коефіцієнті частки ринку, який складає 0,15, при тарифі основного виробника в 1608,77 грн./Гкал, середньозважений тариф для споживачів буде приблизно на 20 % нижче при функціонуванні ринку теплової енергії і складає 1292,63 грн./Гкал. Згідно результатів моделі, відносна ефективність ринку теплової енергії в місті Ірпінь при заданих умовах склала 27,04 %.

На основі розрахованої величини капітальних витрат для створення РТЕ в місті Ірпінь простий термін окупності РТЕ складає 6,7 років, а дисконтований термін окупності складає 13,2 років при ставці дисконту 14 %. В роботі не визначалися джерела фінансування створення РТЕ.

На термін окупності ринку теплової енергії можуть мати вплив наступні параметри: кількість незалежних виробників, об'єм споживання теплової енергії, втрати в теплових мережах, капітальні витрати на створення РТЕ, ставка дисконту, коефіцієнт частки ринку, правила визначення коефіцієнту частки ринку та ефективності РТЕ. Виходячи з цього, важливим є визначення параметрів які найбільше впливають на результати моделі.

Ринок теплової енергії, окрім економічних показників, може мати вплив на такі параметри як екологічна ситуація в регіоні, з точки зору використання місцевих ресурсів з метою їх утилізації, шкідливі викиди (наприклад, якщо мали місце джерела енергії в якості кам'яного або бурого вугілля) та надійність теплостачання в системі. Всі ці показники тим чи іншим чином можуть бути виражені в грошовому еквіваленті і мати вплив на загальний термін окупності місцевого проекту зі створення РТЕ.

Список використаної літератури

1. Карпенко Д.С., Дешко В.І. Побудова ефективної моделі ринку теплової енергії в реаліях України. Енергетика та електрифікація, 2016, с 18-23.

2. Семенов В.Г. Оценка возможности организации конкуренции в системах теплоснабжения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=316.

3. Дешко В.І., Замулко В.І., Карпенко Д.С., Оцінка ефективності функціонування локального ринку теплової енергії. Проблеми загальної енергетики 3(50), 2017, с 41-49.

4. Роберт С. Пиндайк, Дэниел Л. Рубинфельд, Микроэкономика, 2001.

5. Дешко В.І., Карпенко Д.С., Імітаційне моделювання та оптимізація ринку теплової енергії. Матеріали VIII міжнародної науково-практичної конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів і систем», Том 2, - с. 231-232

6. Папушкин В.Н. Радиус теплоснабжения. Хорошо забытое старое - Журнал «Новости теплоснабжения», № 9 (25), сентябрь, 2010, С.44 – 49.

7. Папушкин В.Н., Полянецв С.О., Щербаков А.П., Храпков А.А., Методика расчета радиуса эффективного теплоснабжения для схем теплоснабжения [Электронный ресурс]. – http://www.rosteplo.ru/Npb_files/npb_shablon.php?id=1601.

8. Шевцов А.І., Бараннік В.О., Земляний М.Г., Рязова Т.В. Стан та перспективи реформування системи тепло забезпечення в Україні. Аналітична доповідь.

V. Deshko, Dr. Eng. Sc., Prof. **ORCID** 0000-0002-8218-3933

D. Karpenko, Ph.D. student, **ORCID** 0000-0002-8022-9782

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

TECHNICAL-ECONOMIC ANALYSIS OF THE CREATION OF THE THERMAL ENERGY MARKET IN UKRAINE

The features of the thermal energy market and their influence on its efficiency are described. The technical means of the thermal energy market and their distribution into four zones are defined: the zone of producers, the district heating supply organization zone, the zone of consumers and the zone of state control. The components of capital expenditures for the creation of the heat energy market are described. The essence of the thermal energy market model and the method of calculation of financial indices of thermal energy producers are described. The concept of the thermal energy market efficiency and its payback period are formalized. The project of the thermal energy market in the city of Irpin (Ukraine, Kyiv region) was developed in the author's software "Thermal Energy Market". The basic technical characteristics of the heating system in Irpin under conditions of a monopoly and under conditions of competition are determined. Based on the model, the calculation of the thermal energy market efficiency, the optimal coefficient of market share, and its simple and discontinued payback period in the heat supply system with one main thermal energy producer and seventh independent producers using their own technological processes and sources of energy have been made.

Keywords: thermal energy market, technical and economic analysis, energy sources, efficiency, payback period, heat supply system.

References

1. Karpenko DS, Dshko V.I. Construction of an effective model of the thermal energy market in the realities of Ukraine. Power Engineering and Electrification, 2016, p. 18-23.

2. Semenov VG Assessment of the possibility of competition in heat supply systems [Electronic resource]. - Access mode: http://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=316.

3. Dshko VI, Zamulko VI, Karpenko DS, Estimation of efficiency of functioning of the local market of thermal energy. Problems of general energy 3 (50), 2017, p 41-49.

4. Robert S. Pindike, Daniel L. Rubinfeld, Microeconomics, 2001.

5. Dshko V.I., Karpenko D.S., Simulation and optimization of the heat energy market. Materials of the VIII international scientific and practical conference "Integrated quality assurance of technological processes and systems", Volume 2, - p. 231-232

6. Papushkin VN Radius of heat supply. Well forgotten old - The magazine "News of heat supply", № 9 (25), September, 2010, p.44 - 49.

7. Papushkin VN, Polyantsev SO, Shcherbakov AP, Khrapkov AA, Method of calculating the radius of effective heat supply for heat supply schemes [Electronic resource]. - http://www.rosteplo.ru/Npb_files/npb_shablon.php?id=1601.

8. Shevtsov A.I., Barannik V.O., Zemlyanii M.G., Ryuzova T.V. The state and prospects of reforming the heat supply system in Ukraine. Analytical report.

В.И. Дешко, д-р. техн. наук, проф. ORCID 0000-0002-8218-3933
Д.С. Карпенко, асп. ORCID 0000-0002-8022-9782
Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СОЗДАНИЯ РЫНКА ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ В УКРАИНЕ

Описаны особенности рынка тепловой энергии и их влияние на ее эффективность. Определены технические средства рынка тепловой энергии и их распределение по четырем зонам: зона производителей, зона организации централизованного теплоснабжения, зона потребителей и зона государственного контроля. Описаны компоненты капитальных затрат на создание рынка тепловой энергии. Описана сущность модели рынка тепловой энергии и метод расчета финансовых показателей производителей тепловой энергии. Формализована концепция эффективности рынка тепловой энергии и периода ее окупаемости. Проект рынка тепловой энергии в городе Ирпень (Украина, Киевская область) был разработан в авторском программном обеспечении «Рынок тепловой энергии». Определены основные технические характеристики системы отопления в Ирпене в условиях монополии и в условиях конкуренции. На основе модели, расчет эффективности рынка тепловой энергии, оптимальный коэффициент доли рынка и его простой и прекращенный период окупаемости в системе теплоснабжения с одним основным производителем тепловой энергии и семью независимыми производителями, использующими собственные технологические процессы и источники энергии.

Ключевые слова: рынок тепловой энергии, технико-экономический анализ, источники энергии, эффективность, срок окупаемости, система теплоснабжения.

Надійшла 12.06.2018
Received 12.06.2018

ТЕХНОЛОГІЇ ТА ОБЛАДНАННЯ В ЕНЕРГЕТИЦІ ENERGY TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT

УДК 662.6

В.І. Філатов, канд. техн. наук, ORCID 0000-0002-3046-3546

О.Ю. Тишко, магістр, ORCID 0000-0002-9390-9306

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

СУМІСНЕ СПАЛЮВАННЯ БІОМАСИ ТА АНТРАЦИТУ В ПАРОВОМУ КОТЛІ БЛОКУ 300 МВт

В даній статті розглянута можливість генерації електричної енергії на теплових електростанціях з пилувугільними паровими котлами великої паропродуктивності при сумісному спалюванні кам'яного вугілля (антрациту) і біомаси. На принциповому рівні були розглянуті питання технічної можливості та економічної ефективності такої технології спалювання. Визначено, що для цього потребується створення додаткової інфраструктури в межах схеми приготування і подачі біопалива для спалювання. Виконані теплові розрахунки котла при використанні в якості біомаси відходів кукурудзи і деревини для варіантів, коли біомаса подавалась для спалювання у процентних співвідношеннях 5, 10, 15, 20 та 25% від загальної кількості тепла, що генерується паливом. Розрахунки показують, що при сумісному спалюванні біомаси, економія може складати від 2 до 20% коштів у порівнянні з роботою котла тільки на вугіллі.

Ключові слова: біомаса, антрацит, відходи кукурудзи, відходи деревини, паровий котел, система пилоприготування, сумісне спалювання.

Вступ

Актуальність використання біомаси в якості основного виду палива постійно зростає. Це пов'язано зі значним підвищенням вартості природного газу та дефіцитом окремих видів твердого палива, в першу чергу вугілля антрацитової групи. Подорожчання традиційних палив стимулює використання біомаси в якості палива не тільки в приватному секторі, та в комунальному теплопостачальному господарстві, як при генерації електроенергії на спеціально спроектованих міні-ТЕС, так і на потужних електростанціях. Більш того, перевагами даної технології спалювання являються також:

- мінімальні витрати на капітальне будівництво, оскільки спалювання біомаси відбувається в уже існуючих котлах і потребує тільки створення окремої системи складування, транспортування, та підготовки біомаси для спалювання;
- зменшення викидів забруднюючих речовин у довкілля, оскільки біомаса є CO₂-нейтральним паливом, має значно нижчий (у порівнянні з вітчизняним вугіллям) вміст сірки та сполук азоту;
- зменшення вироблення тепла та електроенергії за рахунок викопного палива;
- утилізація відходів різних виробництв і тим самим зменшення забруднення навколишнього середовища;
- економічна доцільність використання біомаси у вугільних котлоагрегатах при наявності відповідного законодавства («зелений тариф», плата за скидання біомаси у відвали, тощо).

В даний час не існують твердопаливні котли великої потужності, що працюють на біомасі. Це пояснюється як вимогами до конструкції таких котлів, так і можливими сезонними коливаннями кількості потенційного палива. Тому не менш цікавим є питання, впровадження модернізації уже працюючих котлів з частковою заміною базового палива на біомасу, в рамках забезпечення економічної вигоди та зменшення витрат на вугілля. Така технологія потребує попередньо техніко-економічного розрахунку, обґрунтування, аналізу наявності достатнього біопалива для його впровадження, та розробку схеми паливо- та пилоподачі частки біомаси в топку котла.

Постановка задачі

Сумісне спалювання вугілля і біомаси в потужних енергетичних котлах можливо здійснювати шляхом модернізації діючих електростанцій. Цей шлях в даний час є більш прийнятний для України.

Рішення щодо здійснення сумісного спалювання антрациту і біомаси може бути прийняте тільки в разі визначення технічної можливості і економічної доцільності такого заходу.

Технічна можливість визначається наступними чинниками:

- наявністю біомаси прийнятної якості в тій кількості, що дозволить забезпечити постійну роботу потужного енергоблоку впродовж періоду тривалого часу;
- технічною можливістю модернізації діючої та/чи створення нової інфраструктури (паливного господарства), що забезпечить процес подачі біомаси на електростанції від приймальних пристроїв до безпосередньо пальників котла.

Обґрунтування економічної доцільності визначається техніко-економічними показниками котла при його роботі на новому (сумісному) паливі. Оскільки проведення експериментів на реальних установках пов'язане зі значними матеріальними та часовими затратами, що значно обмежує можливу кількість дослідів, постає завдання виконання варіантних теплових розрахунків котла при сумісному спалюванні біомаси і вугілля з метою визначення техніко-економічного обґрунтування.

Для визначення наявності біомаси був проведений аналіз щодо потенціальних видів біомаси, який дає змогу провести загальну оцінку доцільності та економічності [1]. При проведенні аналізу було прийнято допущення, що для використання при сумісному спалюванні в енергетичних котлах буде використовуватись 50% від наявності доступного палива. Такий підхід служить гарантією наявності достатнього запасу палива. Іншими словами, навіть якщо потенціал для енергетичного використання біомаси на перший погляд здається високим, про економічну доцільність і життєздатність проекту використання енергії біомаси можна говорити лише в тому випадку, якщо наявні запаси біомаси в районі його реалізації в 3-4 рази перевищують рівень розрахункової потреби. Результати аналізу наведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Показники найбільш вигідного використання типу біомаси

| Характеристика виду біопалива | Тип біомаси | | | |
|---|-------------------------|--|---|--------------------------------------|
| | Солома зернових культур | Відходи виробництва кукурудзи на зерно (стебла, стрижні) | Деревна біомаса (дрова, парубкові залишки, віходи деревооброки) | Вторинні відходи с/г (лушпиння, жом) |
| Річний запас біомаси в Україні, млн.т/рік | 30,6 | 40,2 | 4,2 | 6,9 |
| Q_n^p , кДж/м ³ | 18, 800 | 15, 500 | 14, 600 | 16, 400 |
| *Часова витрата, т/ч | 12,6 | 15,3 | 16,2 | 14,5 |
| **Необхідна кількість палива в рік на один котел, т/рік | 88200 | 107100 | 113400 | 101500 |

* – при використанні 10% біомаси при сумісному спалюванні по теплу

** – при тривалості експлуатації 7000 год/рік

Важливими паливними характеристиками біомаси, що використовують як тверде паливо, є її теплотворна здатність, вологість, зольність та температура плавлення золи, що впливає на якість та процес горіння у камері котла та поверхонь нагріву. Як відомо, температури плавлення золи соломи зернових культур і лушпиння соняшника складає близько 800 °С, при зольності у межах до 3%, що є достатньо високим показником. Така особливість палива може призвести до шлакування поверхонь нагріву котла, що призводить у подальшому зниження коефіцієнту тепловіддачі поверхонь і відповідно ефективності роботи котла. Тому, з точки зору паливної якості найбільш раціональним є використання деревини та відходи кукурудзи.

В межах визначення технічної можливості щодо діючої та/чи створення нової інфраструктури (паливного господарства), що забезпечить процес подачі біомаси на електростанції була розроблена принципова схема сумісного паливного господарства енергоблоку. За основу були прийняті матеріали уже впроваджені та практично довірені схеми, що використовуються [2,3]. Данна схема паливо-приготування представлена на рис. 1.

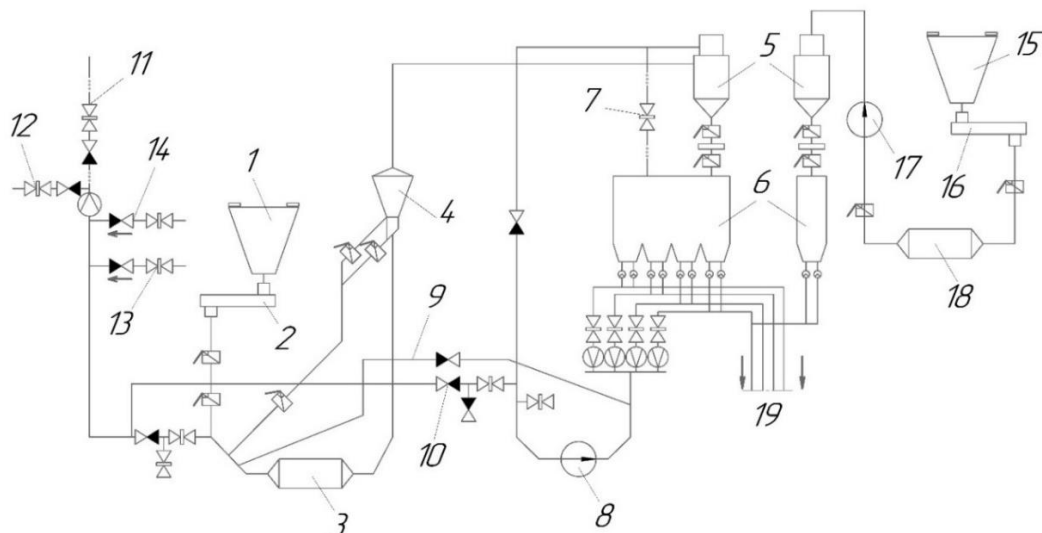


Рисунок 1 – Система пилоприготування котла:

1 – бункер сирого вугілля; 2 – стрічковий живильник сирого вугілля; 3 – млин; 4 – сепаратор; 5 – циклон; 6 – бункер пилу; 7 – вологовідсмок з бункера пилу; 8 – млиновий вентилятор; 9 – лінія рециркуляції; 10 – байпас пилосистеми; 11 – гаряче повітря після повітряпідігрівача; 12 – присадка холодного повітря від дуттьового вентилятора; 13 – гарячі димові гази з газоходу після водяного економайзера від димосмоку рециркуляції газів; 14 – холодні димові гази з газоходу після осьового димосмоку котла від димосмоку присадки газів; 15 – бункер сирого палива біомаси; 16 – стрічковий живильник біомаси; 17 – дуттьовий вентилятор; 18 – молотковий млин з сепаратором; 19 – пилопроводи до пальників.

Подача базового палива сумісно з біомасою, можлива безпосередньо в пальник. Для того щоб організувати подачу біомаси, необхідна організація окремого паливогосподарства на тепловій станції.

Зазначена схема є комбінацією традиційної схеми паливоподачі з елементами, що призначені для підготовки до спалювання і подачі в пилові бункери біомаси. До таких елементів відносяться: бункер сирого палива біомаси, стрічковий живильник біомаси, вентилятор, молотковий млин, пилопроводи до пальників.

Для визначення техніко-економічних показників котла при сумісному спалюванні були проведені варіантні теплові розрахунки котла. В якості прототипу був використаний котел ТПП-312А. Тепловий розрахунок проводився за методикою, визначеною в [4].

Результати розрахунків економічної ефективності

При виконанні розрахунків біли прийняті наступні допущення:

– в якості біопалива були прийняті кукурудза і деревина. Характеристика кожного виду палива представлена в табл. 2;

– розрахунки були проведені при заміні базового палива (по теплу) на 5%, 10%, 15%, 20% та 25% біомаси, для того щоб оцінити найбільш оптимальний вміст суміші, як по економічним так і по технічним характеристикам. Данні результатів розрахунків представлені в табл. 3-4;

– вартість антрациту та біомаси була прийнята на основі середніх цін 2018 року, по зовнішнім джерелам [5,6].

Таблиця 2 – Характеристика палив

| Вид палива | Характеристика палива | | | |
|------------|-----------------------|---------|-------|-----------------|
| | Q_n^p , кДж | W_t^r | A^r | $V_{dry}^{1,4}$ |
| Антрацит | 23571 | 5 | 24,7 | 7 |
| Кукурудза | 14653 | 16,1 | 6,8 | 75 |
| Деревина | 10467 | 40 | 0,6 | 5 |

Таблиця 3 – Характеристика сумісного спалювання кукурудзи та антрациту

| Характеристика | Відсоткова суміш кукурудзи у паливі при сумісному спалюванні | | | | | |
|---|--|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 0% | 5% | 10% | 15% | 20% | 25% |
| Теплота палива, кДж/кг | 23571 | 23127 | 22679 | 22236 | 21788 | 21344 |
| q ₂ , % | 4.99 | 5.05 | 5.10 | 5.16 | 5.22 | 5.28 |
| q ₄ , % | 4 | 3.9 | 3.8 | 3.7 | 3.6 | 3.5 |
| q ₆ , % | 0.35 | 0.34 | 0.34 | 0.33 | 0.32 | 0.32 |
| ККД КУ, % | 90.46 | 90.51 | 90.56 | 90.61 | 90.66 | 90.71 |
| Розрахункова витрата палива антрациту, В _р , т/год | 118,6 | 112,6 | 106,7 | 100,8 | 94,9 | 88,9 |
| Розрахункова витрата палива кукурудзи, В _р , т/год | – | 6,4 | 12,8 | 18,7 | 24,7 | 30,6 |
| Сумарна розрахункова витрата палива, В _р , кг/год | 118 631 | 119 113 | 119 615 | 120 030 | 120 682 | 121 249 |
| Паропроductивність котла, D, т/год | 950 | 932 | 914 | 895 | 878 | 860 |
| *Економія при сумісному спалюванні, грн/год | – | 18 800 | 37 020 | 56 490 | 75 710 | 95 760 |

- 2500 грн - ціна за тону кукурудзи, при ціні атрациту в 5800 грн/т

Таблиця 4 – Характеристика сумісного спалювання деревини та антрациту

| Характеристика | Відсоткова суміш деревини у паливі при сумісному спалюванні | | | | | |
|---|---|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 0% | 5% | 10% | 15% | 20% | 25% |
| Теплота палива, кДж/кг | 23571 | 22918 | 22261 | 21608 | 20950 | 20297 |
| q ₂ , % | 4.99 | 5.04 | 5.09 | 5.14 | 5.19 | 5.25 |
| q ₄ , % | 4 | 3.9 | 3.8 | 3.7 | 3.6 | 3.5 |
| q ₆ , % | 0.35 | 0.34 | 0.34 | 0.33 | 0.32 | 0.31 |
| ККД КУ, % | 90.46 | 90.52 | 90.58 | 90.63 | 90.69 | 90.74 |
| Розрахункова витрата палива антрациту, В _р , т/год | 118,6 | 112,6 | 106,7 | 100,8 | 94,9 | 88,9 |
| Розрахункова витрата палива кукурудзи, В _р , т/год | – | 6 | 12,7 | 18,6 | 24,5 | 30,5 |
| Сумарна розрахункова витрата палива, В _р , кг/год | 118 631 | 118 732 | 119 483 | 119 838 | 120 330 | 120 618 |
| Паропроductивність котла, D, т/год | 950 | 918 | 892 | 862 | 833 | 802 |
| Економія при сумісному спалюванні, грн/год | – | 34 794 | 56 320 | 84 640 | 112 960 | 141 760 |

- 1000 грн - ціна за тону кукурудзи, при ціні атрациту в 5800 грн/т

Для визначення граничних умов паропродуктивності котла були проведені тепловий розрахунок на основі використання 100% кукурудзи та деревини. Розрахунок показав, що проектна паропродуктивність 950 т/год зменшується до 589 т/год і 347 т/год для кукурудзи і деревини відповідно.

При сумісному спалюванні антрациту з біомасою з 25%-м вмістом біомаси, паропродуктивність обмежується всього лиш на 10%, що є допустимим значенням, виходячи з того, що середнє навантаження енергоблоків ТЕС в даний час підтримується на рівні 80% від номінальної.

Результати розрахунків показують, що при додаванні долі біомаси, як відходів кукурудзи так і деревини, зростає не тільки економія у паливі, але й деякі технічні показники. Внаслідок цього ККД котла зростає від 0,05% до 0,28%, але втрати тепла з механічним недопалом та втрати тепла із-за видалення золи і шлаку у топці зменшуються, що призведе до зменшення процесів шлакування поверхонь то більшого терміну експлуатації.

Використання частки палива з великим виходом летючих дозволяє знизити вірогідність використання підсвітки топки природним газом при зниженні якості основного палива.

Основною перевагою спільного спалювання є використання вже існуючого котельного обладнання, що спалює вугілля, що забезпечує найменші капітальні витрати в порівнянні з будівництвом нових котлоагрегатів. Технологія також забезпечує гнучкість використання, дозволяє утилізувати значну кількість біомаси, частково замінити викопне паливо відновлювальним (зазвичай до 20% по масі) CO₂ нейтральним паливом, а також знизити викиди паливних оксидів азоту і оксидів сірки (вміст сірки і азоту в твердій біомасі в середньому в 10 разів нижче ніж у вугіллі).

Висновки

1. Аналіз кількості біопалива в Україні показує, що біоенергетичний потенціал достатній для забезпечення потрібного постачання для сумісного спалювання в енергетичному котлі біомаси.

2. Процес сумісного спалювання не потребує унікальної схеми пилоприготування та пилоподачі палива. За допомогою аналізу європейського та вітчизняного досвіду сумісного спалювання були виконані принципи ідеї схеми паливоприготування, що є сумісною з існуючою схемою пилепоприготування енергоблоку ТЕС, що працює на антрациті. Зазначена схема передбачає подачу частки біомаси безпосередньо у пальники.

3. Проведені розрахунки показують економічну доцільність технології спільного спалювання вугілля і біомаси на діючих пилувугільних котлоагрегатах. В той самий час остаточне визначення оптимального співвідношення часток сумісних палив повинно бути встановлення шляхом проведення промислового експерименту та перевірки.

Список використаної літератури

1. Сільське господарство України. Статистичний збірник 2012. Державна служба статистики України [на укр. яз] <http://www.ukrstat.gov.ua/>
2. Дунаєвська Н.І., Засядько Я.І., Шупік І.С., Щудло Т.С. Огляд технологій спільного спалювання біомаси і вугілля в пилувугільних топках // *Енерготехнологии и ресурсосбережение*, 2007, № 3, с. 3—8.
3. Dunaievskaya N., Chernyavskiy M., Shchudlo T. Co-combustion of solid biomass in pulverized anthracite-coal firing boilers // *Ukrainian Food Journal*, 2016, Vol. 5, p. 748—764.
4. Тепловой расчет котельных агрегатов. Нормативный метод.- М.: Энергия, 1973
5. "ООО УКРРЕСУРС." Якісне вугілля марок Антрацит, Т і ДГ з доставкою по Києву і області [Електронний ресурс] / "ООО УКРРЕСУРС." // http://kievugol.com.ua/?gclid=Cj0KCQjwv73VBRCdARIsAOnG8u2seQ8axI3PnCHCGM-e_wxtWeaV95To480NAEuJhC6_uq3c9-Y8fcgaAmQEEALw_wcB
6. Agro-Ukraine. Дошка агро оголошень України. [Електронний ресурс] / Agro-Ukraine. // agro-ukraine.com – 2018. – Режим доступу: <http://agro-ukraine.com/ua/trade/m-404537/kukurudza-vidkhodi/>

V. Filatov, Cand. Sc. (Eng.); ORCID 0000-0002-3046-3546

O. Tyshko., Msc. ORCID 0000-0002-9390-9306

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

COMBINED COMBUSTION OF BIOMASS AND ANTRACITE IN THE STEAM BOILER OF UNIT 300MW

In the given article, the technology of industrial production of thermal energy from solid biofuels is considered on the example of modern heat generating equipment and auxiliary equipment. To determine the

biomass diversity, an analysis was carried out on potential biomass types, which makes it possible to make a general assessment of feasibility and cost-effectiveness [1]. In the course of the analysis, it was assumed that 50% of available fuel would be used for co-firing in power boilers. This approach serves as a guarantee of the availability of sufficient fuel reserves. In other words, even if the potential for biomass energy use seems to be high at first glance, the feasibility and viability of a project to use biomass energy can only be said if the available biomass reserves in the area of its implementation 3-4 times exceed the level of estimated demand. The important fuel characteristics of biomass used as solid fuel are its calorific value, humidity, ash content and the melting point of ash, which effect on the quality and process of combustion in the boiler chamber and the heating surfaces. As it is known, straw of grain crops has about 800 °C melting point of ash, and the ash content of secondary waste of husk and pulp is about fluctuating within 3-4.5%, which is a rather high indicator. Such quality of fuel leads to slagging of the heating surfaces of the boiler, which leads to a further decrease in the coefficient of heat-generating surfaces and accordingly the efficiency of the boiler. Therefore, from the point of view of fuel quality the most rational is the use of wood and corn waste. At the same time, such technology requires the development of a new infrastructure for feeding and fuel-preparation of biofuels. The scheme was developed on the basis of feeding biofuels directly to burners with anthracite, as domestic and foreign experience shows that such schemes work quite successfully. Calculations show that with the co-combustion of corn, you can save from 2 to 14% of funds when burning only one anthracite, as well as saving on burning wood waste - from 5 to 20%, depending on the proportion of anthracite replacement by heat. Calculations were made in percentages of adding biomass from 5,10,15,20 and 25%.

Key words: biomass, anthracite, corn waste, wood waste, steam boiler, system fuel-preparation, combined combustion.

References

1. Agriculture of Ukraine. Statistical Collection 2012. State Statistics Service of Ukraine [in Ukrainian. <http://www.ukrstat.gov.ua>
2. Dunaevskaya NI, Zasyadko Ya.I., Shupik I.S., Shchudlo T.S. An overview of the technologies of joint combustion of biomass and coal in pit furnaces." *Energotekhnologii i resursosberezhenie* " [Energy Technology and Resource Saving], 2007, No. 3, p. 3-8.
3. Dunaievskaya N., Chernyavskiy M., Shchudlo T. Co-combustion of solid biomass in pulverized anthracite-coal firing boilers // *Ukrainian Food Journal*, 2016, Vol. 5, p. 748-764.
- 4 Thermal calculation of boiler units. Normative method. - Moscow: Energia, 1973
5. LLC "UKRRESURS." Quality coal of Anthracite, T and DG with delivery in Kiev and region [Electronic resource] / ООО UKRESURS. // Kievugol.com.ua - 2018. - Access: http://kievugol.com.ua/?gclid=Cj0KCQjwv73VBRCdARIsAOnG8u2seQ8axI3PnCHCGM-e_wxtWeaV95To480NAEuJhC6_uq3c9-Y8fcgaAmQEEALw_wcB
6. Agro-Ukraine. Ukrainian Agro Board. [Electronic resource] / Agro-Ukraine. // agro-ukraine.com - 2018. - Mode of access: <http://agro-ukraine.com/ru/trade/m-404537/kukurudza-vidkhodi/>

УДК 662.6

В.И. Филатов, канд. техн. наук, ORCID 0000-0002-3046-3546

О.Ю. Тышко, магистр, ORCID 0000-0002-9390-9306

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

СОВМЕСТНОЕ СЖИГАНИЕ БИОМАССЫ И АНТРАЦИТА В ПАРОВОМ КОТЛЕ БЛОКА 300 МВт

В данной статье рассмотрена возможность генерации электрической энергии на тепловых электростанциях с пылеугольными паровыми котлами большой паропроизводительности при совместном сжигании каменного угля (антрацита) и биомассы. На принципиальном уровне были рассмотрены вопросы технической возможности и экономической эффективности такой технологии сжигания. Определено, что для этого требуется создание дополнительной инфраструктуры в пределах схемы приготовления и подачи биотоплива для сжигания. Выполнены тепловые расчеты котла при использовании в качестве биомассы отходов кукурузы и древесины для вариантов, когда биомасса подавалась для сжигания в процентных соотношениях 5, 10, 15, 20 и 25% от общего количества тепла, генерируемого топливом. Расчеты показывают, что при совместном сжигании биомассы, экономия может составлять от 2 до 20% средств по сравнению с работой котла только на угле.

Ключевые слова: биомасса, антрацит, отходы кукурузы, отходы древесины, паровой котел, система пылеприготовления, совместное сжигание.

Надійшла 28.03.2018

Received 28.03.2018

А.А. Редько, д-р техн. наук, проф., ORCID 0000-0003-2331-7273

А.А. Павловская, асп., ORCID 0000-0003-3281-7771

А.В. Давиденко, асп., ORCID 0000-0002-6675-2649

Н.В. Куликова, канд. техн. наук, асс., ORCID 0000-0001-8226-7961

И.А. Редько, канд. техн. наук, доц., ORCID 0000-0002-98634487

Харьковский национальный университет строительства и архитектуры,
Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А.М. Бекетова

ВЛИЯНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВИХРЕВОГО ГОРЕЛОЧНОГО УСТРОЙСТВА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕПЛООБМЕНА В ТОПКЕ ПАРОВОГО КОТЛА

В Украине находится в эксплуатации значительное количество бытовых и промышленных котлов. В данной работе приведены результаты численного исследования процессов сжигания газообразного топлива в топке парового водотрубного котла ДЕ-10/14. Горелочное устройство ГМГ-7 производительностью 728 м³/ч природного газа обеспечивает вихревой короткий и широкий факел. Топливоздушная смесь образуется путём предварительного смешения 15% части воздуха, с первичным коэффициентом крутки горелки $n=2,4$, и вторичным коэффициенте крутки горелки $n=1,6$, и коэффициентом избытка воздуха $\alpha_6=1,10$. Рассматривался вариант установки лопаток в канале первичного воздуха с углом $\varphi_1=45^\circ$, а в канале вторичного воздуха с углом $\varphi_2=60^\circ$. Амбразура горелки коническая с углом раскрытия 60° . Закрутка первичного и вторичного воздуха – в одну сторону. В результате исследований определены распределения температуры и скорости газов в топочном объёме, плотности тепловых потоков на экранные трубчатые поверхности, концентрации компонентов горения. Математическая модель радиационно-конвективного теплообмена в газовом тракте котла сформирована на основе усреднённых по Рейнольдсу уравнений Навье – Стокса с учётом гравитации и с пренебрежением сжимаемостью. Модель составляют уравнение неразрывности, переноса импульса, энергии и химических компонентов газовой смеси, записанные в стационарной форме. Уравнения замкнуты законом Ньютона для тензора давления, законом Фурье для теплового потока, законом Фика для потока массы, законом Клайперона – Менделеева для термодинамического состояния смеси газов, уравнениями модели турбулентности $k-\varepsilon$ Лаундера – Сполдинга и модели турбулентного горения Магнусена – Хертагера. Моделирование выполнено методом контрольного объёма. При значении угла наклона лопаток регистра $\varphi_2=60^\circ$ в канале потока вторичного воздуха и $\varphi_1=45^\circ$ в канале первичного воздуха наблюдается широкое раскрытие факела V -образного вида вблизи среза горелки на расстоянии 0,5 – 0,6 м. Горение газозвушной смеси происходит в узких струях раскрытого факела на расстоянии 1,0 – 1,5 м. Температура газов в струях факела составляет около 1500 – 1700°C. При этом, узкие струи движутся вблизи экранных поверхностей теплообменных труб. Установлено, что структура факела при угле установки лопаток $\varphi_2=45^\circ$ симметричная и устойчивая, а размеры факела больше соответствуют геометрии топочного объёма. При этом, не наблюдается наброс факела на экранные боковые поверхности и днище топки, затягивания факела в конвективный пучок. Однако, температура газов и плотности теплового потока недостаточно высокие – средние значения составляют около $q=100$ кВт/м² (при $q^{cp}=76,8$ кВт/м²).

Ключевые слова: численное моделирование, теплообмен, паровой водотрубный котёл, вихревая горелка, угол установки лопаток.

Постановка проблемы. В настоящее время на жилищно-коммунальных предприятиях находится в эксплуатации значительное количество водотрубных паровых котлов типа ДКВР. Водотрубные котлы характеризуются экономичностью, взрывобезопасностью и работой в автоматическом режиме [1-3]. Их наименее затратная реконструкция выполняется в основном путём замены горелочного устройства. Эффективность замены горелки оценивается применением компьютерных технологий [4-10]. Численное моделирование котельного оборудования становится одним из важнейших способов получения наиболее полной информации об аэродинамике, локальных и интегральных характеристиках теплообмена. Применение численных методов исследования позволяет определить распределение температуры и скорости газов в топочном объёме, локальную плотность теплового потока и другие параметры.

© А.А. Редько, А.А. Павловская, А.В. Давиденко, Н.В. Куликова, И.А. Редько, 2018

Анализ литературы. В последние годы численными методами получены результаты теплообмена в топках различных паровых котлов [3-10]. В основном широко исследовались топki жаротрубных котлов [3-7]. В работе [3] приведены результаты исследования парового двухбарабанного водотрубного котла ДКВР-20, который конструктивно отличается от других котлов типа ДКВР (ДЕ). При этом в [3] не указаны характеристики горелок котла, что затрудняет анализ полученных результатов, так как эффективность теплообмена существенно зависит от процесса горения и аэродинамических течений в топочном объеме котла. В [8] выполнено численное исследование по интеграции горелки ГБГМ-0,85НД в топочное пространство котла НИИСТУ-5. Результаты расчёта распределений скорости топочных газов, полей температур и концентраций оксидов азота показали необходимость защиты заднего экрана топki котла, позволили сформулировать обоснованные технические предложения по установке горелки и режимам эксплуатации котла. В [9] выполнены численные исследования рабочих процессов при сжигании газообразного топлива в котлах типа ДКВР. Получены распределения полей скорости, концентрации и температуры в топочном объеме котла ДКВР-4/13 с двумя газомазутными горелками ГМГ-2,0. Расчёты показали сложный трёхмерный характер потоков в топке. Закрученные потоки раскрываются с образованием зоны обратного течения на оси каждой горелки. Совместная работа горелок образует два отдельных факела длиной около 1,5 м. Анализ полей концентрации топлива показал, что основная часть топлива сгорает на расстоянии 0,5 м от среза горелок, а процесс дожигания завершается на расстоянии 1,2 м от среза горелок.

Однако, конструкции котлов существенно отличаются геометрическими параметрами и конфигурацией, типом горелок, их количеством, мощностью и расположением в топочном объеме, что в значительной мере определяет эффективность рабочих процессов. Поэтому, при модернизации конкретного типа котла требуется детальное исследование влияния изменений процессов сжигания топлива, теплообмена и аэродинамики в топочном объеме, вызванных конструктивными и технологическими мероприятиями.

В работах [3-10] показана эффективность применения компьютерного моделирования при модернизации котлов и камер сгорания, что и определило актуальность дальнейших исследований по повышению эффективности теплообмена в топке парового котла.

Цель статьи. Численное исследование влияния характеристик вихревых горелок на эффективность процессов сжигания газообразного топлива (метана).

Объект и методика исследования. Исследован вертикально-водотрубный газомазутный котел ДЕ-10-14ГМ с горелочным устройством ГМГ-7, предназначенный для производства, насыщенного и слабо перегретого пара с температурой 225°C с абсолютным давлением 14 кгс/см², номинальной производительностью 10 т/ч.

На рисунке 1 представлена геометрическая модель горелки и котла.

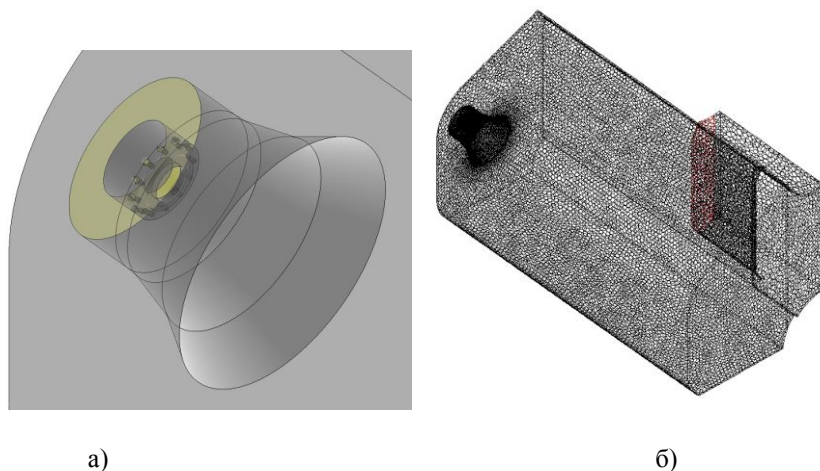


Рисунок 1 – Расчётные модели: а) – модель горелки; б) – расчётная сетка топki котла.

Воздух в горелку ГМГ поступает двумя потоками – около 15 % в виде первичного воздуха через регистр с углом лопаток 60° (коэффициент крутки $n_1=2,4$), другая часть в виде вторичного воздуха в объеме около 95% закручивается в лопаточном аппарате регистра, лопатками, установленными под углом 45°, коэффициент крутки $n_2=1,6$. Подача газа – центральная (42 отверстия), параллельно воздушному потоку при коэффициенте избытка воздуха $\alpha=1,10$. Рассматривался вариант установки лопаток в канале первичного воздуха с углом $\varphi_1=45^\circ$, а в канале вторичного воздуха с углом $\varphi_2=60^\circ$. Амбразура горелки

коническая с углом раскрытия 60° . Закрутка первичного и вторичного воздуха – в одну сторону. Математическая модель радиационно-конвективного теплообмена в газовом тракте котла сформирована на основе усреднённых по Рейнольдсу уравнений Навье – Стокса с учётом гравитации и с пренебрежением сжимаемостью [11-16]. Модель составляют уравнение неразрывности, переноса импульса, энергии и химических компонентов газовой смеси, записанные в стационарной форме. Уравнения замкнуты законом Ньютона для тензора давления, законом Фурье для теплового потока, законом Фика для потока массы, законом Клайперона – Менделеева для термодинамического состояния смеси газов, уравнениями модели турбулентности $k-\varepsilon$ Лаундера – Сполдинга и модели турбулентного горения Магнусена – Хертагера. Моделирование выполнено методом контрольного объёма.

Основные результаты и их анализ. Угол наклона лопаток влияет на структуру факела и процессы теплообмена в топке котла. При значении угла наклона лопаток регистра $\varphi_2=60^\circ$ в канале потока вторичного воздуха и $\varphi_1=45^\circ$ в канале первичного воздуха наблюдается широкое раскрытие факела V – образного вида вблизи среза горелки на расстоянии $0,5 - 0,6$ м (рис. 1). Горение газовой смеси происходит в узких струях раскрытого факела на расстоянии $1,0 - 1,5$ м. Температура газов в струях факела составляет около $1500 - 1700^\circ\text{C}$. При этом, узкие струи движутся вблизи экранных поверхностей теплообменных труб. На рисунке 2 показаны горизонтальные сечения распределения температуры газов в объёме топki.

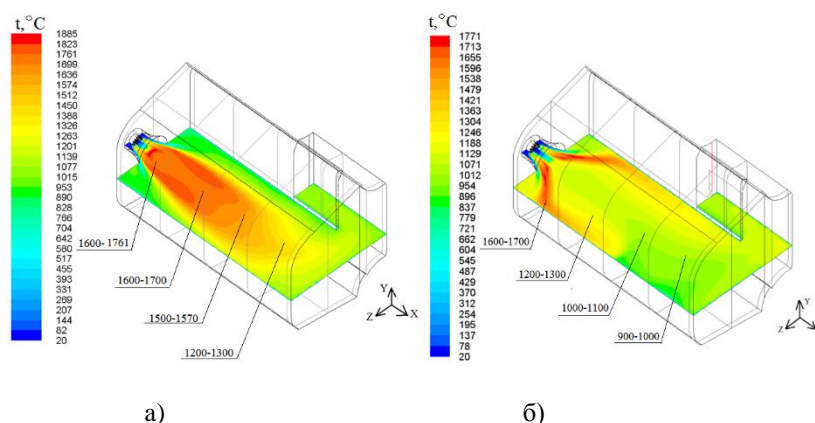


Рисунок 2 – Распределение температуры газового потока в топке:
 а) – $\varphi_1=60^\circ$ и $\varphi_2=45^\circ$; б) – $\varphi_1=45^\circ$ и $\varphi_2=60^\circ$

Температура газов в струйном факеле составляет $1700 - 1750^\circ\text{C}$, а температура газов вблизи боковых стенок теплообменных поверхностей изменяется от 1400 до 800°C . На рисунке 3 приведены средние значения температуры газов по глубине топki.

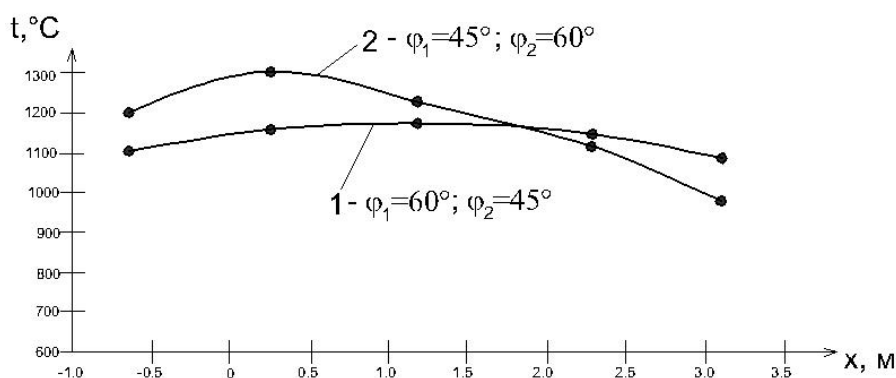


Рисунок 3 – Температура газов по глубине топki.

Температура газов изменяется от 1376°C до 1046°C на выходе из топki. Заполненность газами топчного объёма неполная, и составляет около $0,7 - 0,75$ объёма топki.

На рисунке 4 показаны распределения лучистой плотности теплового потока в трёхмерном изображении.

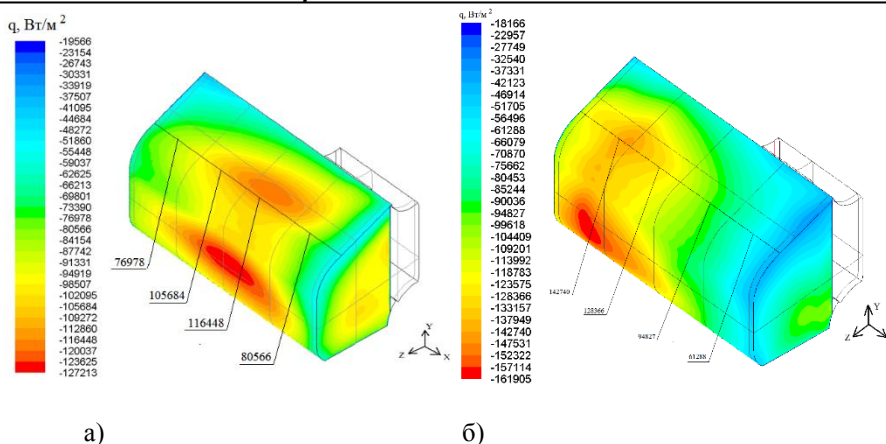


Рисунок 4 – Интенсивность радиационного теплового потока на стенках:
 а) – $\varphi_1=60^\circ$ и $\varphi_2=45^\circ$; б) – $\varphi_1=45^\circ$ и $\varphi_2=60^\circ$

Плотность теплового потока неравномерная по площади теплообменной поверхности. Максимальные локальные значения плотности суммарного теплового потока для варианта $\varphi_1=45^\circ$ и $\varphi_2=60^\circ$ наблюдаются вблизи горелки на расстоянии $0,7=0,8$ м и составляют $202-207$ кВт/м², затем снижаются до значения $70-80$ кВт/м² на расстоянии $2-2,2$ м, а дальше до значения $55-65$ кВт/м² на остальном расстоянии глубины топки. Для варианта $\varphi_1=60^\circ$ и $\varphi_2=45^\circ$ максимальные значения плотности суммарного теплового потока составляют $151-154$ кВт/м². Значение плотности лучистого теплового потока характеризуется неравномерностью по глубине топки. Максимальные значения локальной плотности лучистого потока для варианта $\varphi_1=45^\circ$ и $\varphi_2=60^\circ$ составляют $152-157$ кВт/м², т.е. $78-80\%$ от суммарного теплового потока. Затем плотность теплового потока понижается до значений 80 кВт/м². Для варианта $\varphi_1=60^\circ$ и $\varphi_2=45^\circ$ максимальные значения плотности лучистого теплового потока составляют $123-127$ кВт/м² и понижаются до значений $90-80$ кВт/м². На рисунке 5 приведены средние значения плотности теплового потока по глубине топки.

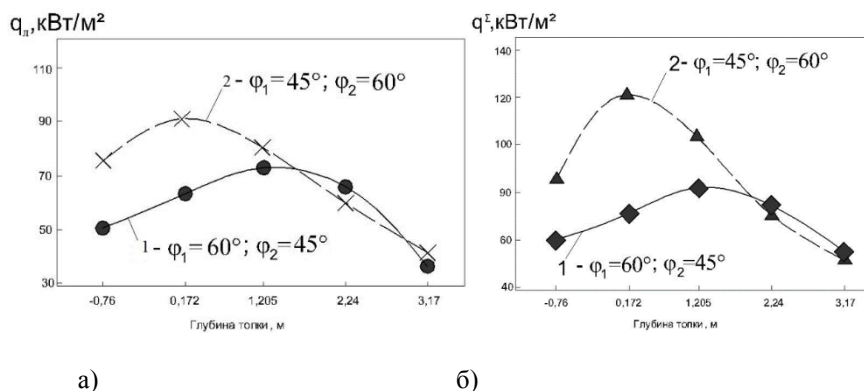


Рисунок 5 – Плотность теплового потока по глубине топки:
 а) – лучистая составляющая; б) – суммарная составляющая.

При установке лопаток $\varphi_1=60^\circ$ и $\varphi_2=45^\circ$ вблизи стенки температура газов более низкая $800-900^\circ\text{C}$, и поэтому плотности лучистого потока более низкие и составляют от 50 до 70 Вт/м². Следует отметить, что температура поверхности днища топочной камеры, достигает значений $800-950^\circ\text{C}$ для варианта – $\varphi_1=60^\circ$ и $\varphi_2=45^\circ$; и $1030-1070^\circ\text{C}$ для варианта – $\varphi_1=45^\circ$ и $\varphi_2=60^\circ$.

Выводы: Результаты численного исследования указывают на существенное влияние угла наклона лопаток в регистрах горелочного устройства на процессы теплообмена газов в топочном объеме водотрубного котла. Установлено, что структура факела при угле установки лопаток $\varphi_2=45^\circ$ симметричная и устойчивая, а размеры факела больше соответствуют геометрии топочного объема. При этом, не наблюдается наброс факела на экранные боковые поверхности и днище топки, затягивания факела в конвективный пучок. Однако, температура газов и плотности теплового потока недостаточно высокие – средние значения составляют около $q=100$ кВт/м² (при $q^{\text{cp}}=76,8$ кВт/м²).

Список использованной литературы

1. Тепловой расчёт котельных агрегатов. Нормативный метод. М.: Энергия, 1973. 232с.
2. Акопянц Б.Е. Недостатки конструкции промышленных котлов ДКВР-20-13 / Б.Е. Акопянц / Новости теплоснабжения. – 2000. – №4. – С. 10-11.
3. Тайлашева Т.С. Анализ опыта эксплуатации котлов типа ДКВР/ Т.С. Тайлашева // Вестник науки Сибири. – 2014. – №3(13). – С. 11-15.
4. Басок Б.И. Численное моделирование процессов аэродинамики в топке водогрейного котла с вторичным излучателем / Б.И. Басок, В.Г. Демченко, М.П. Мартыненко // Промышленная теплотехника. – 2006. – Т. 28, № 1. – С. 17-22.
5. Герман М.Л. Инженерный метод расчета температурного режима жаротрубных котлов с тупиковой топкой / М.Л. Герман, В.А. Бородуля, Е.Ф. Ноготов, Г.И. Пальченок // Теплообмен ММФ-2000: Труды IV Минского Междунар. форума. – Минск, 2000. Т.2. – С. 21-30.
6. Хаустов С.А. Численное исследование процессов в жаротрубной топке с реверсивным факелом / С.А. Хаустов, А.С. Загорин, Р.Н. Фисенко // Известия Томского политехнического университета. – 2013. Том 322. – № 4. – С. 43-47.
7. Михайлов А. Г. Методы расчёта теплообмена в топках котлов / А.Г. Михайлов // Омский научный вестник. – 2008. – №3(70). – С. 81-84.
8. Долинский А.А. Использование компьютерного моделирования при малозатратной модернизации котла НИИСТУ-5 / А.А. Долинский, А.А. Халатов, С.Г. Кобзарь, О.А. Назаренко, А.А. Мещеряков // Пром. Теплотехника. – 2007. – т.29, №5. – С. 80-91.
9. Кобзарь С.Г. Снижение выбросов оксидов азота в газовых котлах методом рециркуляции дымовых газов / С.Г. Кобзарь, А.А. Халатов // Пром. теплотехника, 2009, т. 31, №4, С. 5-11.
10. Редько А.О. Моделювання процесів теплообміну в топках водотрубних котлів ДКВР(ДЕ)-10/14 / А.О. Редько, А.В. Давіденко, С.В. Павловський, Н.В. Кулікова, В.Є. Костюк, О.І. Кирилаш // Вісник НУ «Львівська політехніка». Серія: Теорія та практика будівництва. – 2016. – №844. – С. 180-187.
11. Андерсон Д. Вычислительная гидромеханика и теплообмен / Д. Андерсон, Дж. Таннехилл, Р. Плетчер // М.: Мир, 1990. – Т. 1. – 384 с.
12. Jakobsen H. A. Chemical Reactor Modeling. – Springer, 2008. – 1244p.
13. Peters N. Turbulent combustion. – Cambridge University Press, 2000. – 304p.
14. Суржигов С. Т. Тепловое излучение газов и плазмы/ С.Т. Суржигов // М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. – 544 с.
15. Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкости/ К. Флетчер // М.: Мир, 1991. – Т. 1. – 502 с.
16. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости/ С. Патанкар // М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.

УДК 621.184.004

А.О. Редько, д-р техн. наук, проф., **ORCID** 0000-0003-2331-7273

А.О. Павловська, асп., **ORCID** 0000-0003-3281-7771

А.В. Давіденко асп., **ORCID** 0000-0003-3281-7771

Н.В. Кулікова канд. техн. наук, асист., **ORCID** 0000-0001-8226-7961

І.О. Редько, канд. техн. наук, доц., **ORCID** 0000-0002-9863-4487

**Харківський національний університет будівництва та архітектури,
Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова**

ВПЛИВ ХАРАКТЕРИСТИК ВИХРОВОГО ГОРІЛЧАНОГО ПРИСТРОЮ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТЕПЛОБМІНУ В ТОПЦІ ПАРОВОГО КОТЛА

В Україні перебуває в експлуатації значна кількість побутових і промислових котлів. У даній роботі наведені результати чисельного дослідження процесів спалювання газоподібного палива в топці парового водотрубний котла ДЕ-10/14. Пальниковий пристрій ГМГ-7 продуктивністю 728 м³/год природного газу забезпечує вихровий короткий і широкий факел. Паливо-повітряна суміш утворюється шляхом попереднього змішування 15% частини повітря, з первинним коефіцієнтом крутки пальники $n = 2,4$, і вторинним коефіцієнті крутки пальники $n=1,6$, і коефіцієнтом надлишку повітря $\alpha_a=1,10$. Розглядався варіант установки лопаток в каналі первинного повітря з кутом $\phi_1=45^\circ$, а в каналі

вторинного повітря з кутом $\varphi_2=60^\circ$. Амбразура пальника конічна з кутом розкриття 60° . Закручування первинного і вторинного повітря – в одну сторону. В результаті досліджень визначено розподілу температури і швидкості газів в топковому об'ємі, щільності теплових потоків на екранні трубчасті поверхні, концентрації компонентів горіння. Математична модель радіаційно-конвективного теплообміну в газовому тракті котла сформована на основі усереднених по Рейнольдсу рівнянь Нав'є-Стокса з урахуванням гравітації і з невагою стисливістю. Модель складають рівняння нерозривності, перенесення імпульсу, енергії і хімічних компонентів газової суміші, записані в стаціонарній формі. Рівняння замкнуті законом Ньютона для тензора тиску, законом Фур'є для теплового потоку, законом Фіка для потоку маси, законом Клайперона-Менделєєва для термодинамічної стану суміші газів, рівняннями моделі турбулентності $k-\varepsilon$ Лаундер-Сполдинга і моделі турбулентного горіння Магнусена-Хертагера. Моделювання виконано методом контрольованого обсягу. При значенні кута нахилу лопаток реєстра $\varphi_2=60^\circ$ в каналі потоку вторинного повітря і $\varphi_1=45^\circ$ в каналі первинного повітря спостерігається широке розкриття факела V-образного виду поблизу зрізу пальника на відстані 0,5 – 0,6 м. Горіння газо-повітряної суміші відбувається в вузьких струменях розкритого факела на відстані 1,0 – 1,5 м. Температура газів в струменях факела становить близько 1500 – 1700°C. При цьому, вузькі струмені рухаються поблизу екранних поверхонь теплообмінних труб. Встановлено, що структура факела при вугіллі установки лопаток $\varphi_2 = 45^\circ$ симетрична і стійка, а розміри факела більше відповідають геометрії топкового обсягу. При цьому, не спостерігається накид факелу на екранні бічні поверхні і днище топки, затягування факела в конвективний пучок. Однак, температура газів і щільності теплового потоку не досить високі – середні значення складають близько $q = 100 \text{ кВт/м}^2$ (при $q^{cp} = 76,8 \text{ кВт/м}^2$).

Ключові слова: чисельне моделювання, теплообмін, паровий водотрубний котел, вихровий пальник, кут установки лопаток.

A. Redko, Dr. Sc. Sciences., Prof., **ORCID** 0000-0003-2331-7273
A. Pavlovskay, post-graduate student, **ORCID** 0000-0003-3281-7771
A. Davidenko, post-graduate student, **ORCID** 0000-0003-3281-7771
N. Kulikova, PhD Tech., assistant, **ORCID** 0000-0001-8226-7961
I. Redko, PhD Tech., associate professor, **ORCID** 0000-0002-9863-4487
Kharkiv National University of Construction and Architecture,
O.M.Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv

INFLUENCE OF CHARACTERISTICS VORTEX BURNER FOR HEAT TRANSFER EFFICIENCY IN THE FURNACE BOILER

In Ukraine, a significant number of domestic and industrial boilers are in operation. In this paper, we present the results of a numerical study of the processes of burning gaseous fuels in a furnace of a steam water-tube boiler DE-10/14. The burner device GMG-7 with a capacity of 728 m³/h of natural gas provides a swirling short and wide torch. The fuel-air mixture is formed by premixing 15% of the air, with a primary twist factor $n = 2.4$, and a secondary burner twist ratio $n = 1.6$, and an excess air factor $\alpha_a = 1.10$. The option of installing blades in the primary air duct with an angle $\varphi_1 = 45^\circ$ was considered, and in the secondary air channel with an angle $\varphi_2=60^\circ$. The burner embrasure is conical with an opening angle of 60° . Twist of primary and secondary air – one way. As a result of the research, the temperature and velocity distributions of gases in the combustion chamber, the density of heat flows on the screen tubular surfaces, and the concentrations of the combustion components were determined. The mathematical model of radiation-convective heat transfer in the gas path of the boiler is formed on the basis of the Reynolds-averaged Navier-Stokes equations with allowance for gravity and neglect of compressibility. The model is the equation of continuity, momentum transfer, energy and chemical components of the gas mixture recorded in a stationary form. The equations are closed by the Newton law for the pressure tensor, the Fourier law for the heat flux, the Fick law for the mass flow, the Clapeyron-Mendeleev law for the thermodynamic state of the gas mixture, the equations of the Launder-Spaulding turbulence model and the Magnusen-Hertager turbulent combustion model. The simulation is performed by the control volume method. At a slope angle of the blades of the register $\varphi_2=60^\circ$ in the secondary air flow path and $\varphi_1 = 45^\circ$ in the primary air duct, a wide opening of the V-shaped flame near the cutoff of the burner at a distance of 0.5 to 0.6 m is observed. Combustion of the gas – in narrow jets of the open torch at a distance of 1.0 – 1.5 m. The temperature of the gases in the streams of the torch is about 1500 – 1700°C. In this case, narrow jets move near the screen surfaces of the heat exchange tubes. It is established that the structure of the flame at the angle of installation of the blades $\varphi_2 =$

45° is symmetrical and stable, and the dimensions of the torch correspond more to the geometry of the combustion volume. At the same time, no flare is observed on the screen side surfaces and the bottom of the furnace, tightening the torch in a convective beam. However, the temperature of the gases and the density of the heat flow are not high enough – the average values are about $q=100 \text{ kW/m}^2$ (at $q^{ep} = 76.8 \text{ kW/m}^2$).

Keywords: numerical modeling, heat exchange, steam water-tube boiler, vortex burner, the installation angle of vanes.

References

1. The heat calculation of boiler units. Normative method. M.: Energia, 1973. 232 p.
2. Akopyants B.E. “Disadvantages of the design of industrial boilers DKVR-20-13”, Heating News, 2000. – №4. – pp. 10-11.
3. Taylasheva T.S. “Analysis of operating experience DKVR type boilers Siberia”, Bulletin of Science, 2014. – №3 (13), pp.11-15.
4. Basok B.I. Demchenko V.G. and Martynenko M.P. “Numerical simulation of aerodynamic processes in the furnace of the boiler with a secondary transmitter”, Industrial heating engineering, 2006. – Vol. 28, № 1, pp. 17-22.
5. Herman M.L. Borodulya V.A., Nogotov E.F. and Palchenok G.I. “Engineering calculation method of temperature fire-tube boilers with a dead-end furnace”, Heat and Mass Transfer MMF-2000: Proceedings of IV Minsk Internat. offline, 2000. – Vol. 2, pp. 21-30.
6. Khaustov S.A. Zavorin A.S. and Fissenko R.N., “Numerical study of processes in the fire tube furnace with reversible torch”, Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, 2013. – Vol 322, № 4, pp. 43-47.
7. Mikhailov A.G. “Methods for calculating heat transfer in boiler furnaces”, Scientific Bulletin, Omsk, 2008. – №3 (70), pp. 81-84.
8. Dolinsky A.A., Khalatov A.A., Kobzar S.G., Nazarenko O.A. and Meshcheryakov A.A. “Using a computer simulation at low-cost modernization of boiler NIISTU-5”, Prom. Heat, 2007. – Vol.29, №5, pp. 80-91.
9. Kobzar S.G. “Reducing emissions of nitrogen oxides in the gas boiler by flue gas recirculation”, Prom. Heat, Heat Engineering, 2009. – Vol. 31, №4, p. 5-11.
10. Red'ko A.O., Davidenko A.V., Pavlovsky S.V., Kulikova N.V., Kostyuk V.E. and Kyrylash O.I. “Modeling of heat transfer in furnaces water tube boilers DKVR (DE)-10/14”, News NU "Lviv politehnika". Series: Theory and practice of construction, Lviv, 2016. – №844, pp. 180-187.
11. Anderson J., Tannehill G. and Pletcher R. “Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer”, Mir, Moscow, 1990. – Vol. 1, 384 p.
12. Jakobsen H. A. “Chemical Reactor Modeling”, Springer, 2008. – 1244 p.
13. Peters N., “Turbulent combustion”, Cambridge University Press, 2000, 304 p.
14. Surzhikov S.T. “Thermal radiation of gases and plasma”, Publishing House of the MSTU. Bauman, 2004, 544 p.
15. Fletcher K. “Computational methods in fluid dynamics”, Mir, Moscow, 1991. – T.1. - 502.
16. Patankar S. “Numerical methods for solving problems of heat transfer and fluid dynamics” Energoatomisdat, Moscow, 1984, 152 p.

Надійшла 31.05.2018
Received 31.05.2018

УДК 621.18.063

С.А. Рева, инженер, ORCID 0000-0003-0226-706X

А. М. Терех, канд. техн. наук., ст. науч. сотр., ORCID 0000-0002-1320-8594

В.А. Рогачев, канд. техн. наук., доц., ORCID 0000-0001-5489-874X

А.И. Руденко, канд. техн. наук., доц., ORCID 0000-0002-8541-9710

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

ОЦЕНКА ТЕПЛОАЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПАКЕТОВ ВИНТООБРАЗНЫХ ТРУБ

На основе усовершенствованного метода выполнена оценка теплоаэродинамической эффективности шахматных пакетов винтообразных и гладких круглых труб. Проведено сравнение их теплоаэродинамических, весовых, габаритных характеристик на примере теплового и аэродинамического расчетов воздухоподогревателя-регенератора. По результатам сравнительного анализа показаны преимущества винтообразных труб с равноразвитой поверхностью нагрева над поверхностями из традиционных труб круглого сечения.

Ключевые слова: винтообразная труба, пакет, поверхность, эффективность, регенератор, расчет, сравнение.

Введение

Создание любого теплообменного оборудования всегда связано с расчетами тепловых потоков между „горячей” и „холодной” средами. При этом для разработчиков одной из основных задач является выбор поверхностей нагрева теплообменного устройства, площадь поверхности которых способна передать заданное количество теплоты при, как можно меньшем аэродинамическом сопротивлении.

Практический опыт показывает, что такие поверхности состоят в большинстве случаев из пластинчатых или трубчатых элементов разных конструкций, форм и геометрии, с оребрением или без него. Поэтому для сравнения теплопередающих элементов между собой и выбора лучшего из них с точки зрения теплообмена и аэродинамического сопротивления, необходимо представлять уровень их теплоаэродинамической эффективности.

Анализ литературных источников

Оценка, сравнение и выбор более эффективных теплообменных поверхностей является достаточно сложной задачей в первую очередь из-за необходимости учета большого количества теплоаэродинамических показателей, характеризующих работу теплообменного устройства и тесно связанных между собой. К таким показателям можно отнести коэффициент теплоотдачи, аэродинамическое сопротивление, компактность, массу труб, стоимость теплообменной поверхности.

Разработке методов сравнения различных теплообменных поверхностей по теплоаэродинамической эффективности на основе разных условий и критериев посвящено достаточно большое количество исследований [1-5]. В них, как правило, преимущество того или иного типа поверхности с энергетической точки зрения характеризуется отношением переданного количества теплоты через данную поверхность к энергии, затраченной теплоносителем на преодоление ее сопротивления. Сравнение же поверхностей между собой (или с эталонной) и выбор из них более эффективной, осуществляется путем установки взаимосвязи между теплоотдачей и сопротивлением при равенстве чисел Рейнольдса с привлечением сведений о массо-габаритных характеристиках сравниваемых объектов. Например, в усовершенствованном обобщенном способе [6], в качестве критерия сравнения используются эффективные числа Нуссельта при равенстве эффективных чисел Рейнольдса, которые характеризуют рабочие параметры теплообменных поверхностей: тепловую мощность и мощность на прокачку теплоносителя, его теплофизические свойства и температурный напор. Такой способ расчета указанных параметров, по мнению авторов [6], позволяет проводить исследование теплообменных поверхностей, образованных геометрически неподобными каналами при произвольной форме представления данных по теплообмену и гидравлическому сопротивлению.

Для выбора наиболее эффективных поверхностей теплообмена в работах [7, 8] предложен метод оценки эффективности на основе фактора аналогии Рейнольдса (ΦAP), характеризующего свойства используемого интенсификатора теплообмена (зависимость отношения степени интенсификации (Nu/Nu_0) к отношению потерь давления интенсифицированной поверхности к потерям давления эталонной поверхности без интенсификаторов f/f_0).

© С.А. Рева, А. М. Терех, В.А. Рогачев, А.И. Руденко, 2018

$$\Phi AP = (\text{Nu}/\text{Nu}_0)/(f/f_0). \quad (1)$$

Фактор аналогии Рейнольдса показывает на сколько рост интенсивности теплообмена опережает или отстает от роста гидродинамического сопротивления той или другой интенсифицированной поверхности по сравнению с эталонной, а также отображает темп изменения этого показателя от изменения f/f_0 . Поверхность считается совершенной, если $f/f_0 \leq 1$, а $\Phi AP > 1$. Как указано в [8], при использовании фактора аналогии Рейнольдса неравенство $\Phi AP < 1$ не означает ухудшения теплогидравлических свойств интенсифицированной поверхности, а лишь показывает невозможность улучшения теплогидравлических характеристик за счет данного метода интенсификации теплообмена.

Преимуществом данного метода сравнения конвективных поверхностей нагрева является: отсутствие необходимости выполнения большого количества дополнительных расчетов, простота и удобство. Полученная картина наглядно отображает величину теплоаэродинамической эффективности одновременно для всех сравниваемых пакетов труб в широком диапазоне изменения мощности на прокачку теплоносителя через пакет. Графическое представление зависимости ΦAP от отношения f/f_0 позволяет наглядно оценить и выбрать наилучшую по теплоаэродинамической эффективности поверхность.

Авторами [9,10] для определения эффективности поверхностей в виде штырей различной формы использовался, так называемый, удельный коэффициент потерь давления („specific friction loss”) ε_f в виде

$$\varepsilon_f = f/\text{Nu}_D, \quad (2)$$

где f - фактор трения (общий коэффициент потерь давления), Nu_D - число Нуссельта поверхности при соответствующем числе Рейнольдса. Параметр ε_f показывает, как при изменении чисел Рейнольдса изменяется соотношение потерь давления по отношению к росту или уменьшению интенсивности теплоотдачи.

Таким образом, разработчик имеет возможность выбрать такую конструкцию поверхности теплообменного устройства, которая позволяет передать заданное количество теплоты при её минимальных габаритах и с наименьшими затратами энергии на прокачку теплоносителя через неё.

Цель и задачи

Целью исследований является определение эффективности поверхностей из пакетов винтообразных труб на основе усовершенствованного метода оценки эффективности и сравнение их с пакетами гладких круглых труб.

Для достижения цели поставлены следующие задачи:

- обосновать и усовершенствовать метод оценки теплоаэродинамической эффективности трубчатых поверхностей;
- установить влияние параметра размещения винтообразных труб в пакете на их теплоаэродинамическую эффективность;
- сравнить эффективность воздухоподогревателя-регенератора, выполненного из винтообразных и круглых труб по теплоаэродинамическим и массогабаритным характеристикам.

Объект исследований

Однозаходные винтообразные трубы с равноразвитой внутренней и внешней поверхностями (рис. 1) изготавливались с помощью роликового обкатывания тонкостенной круглой трубы с внутренним формирующим элементом [11]. Технология изготовления таких труб предложена и освоена в „КПИ им. И. Сикорского”. Степень развития площади поверхности таких труб (отношение внешней или внутренней площади поверхности винтообразной трубы к площади поверхности соответствующей круглой гладкой трубы) может достигать значений от 1,15 до 1,4 по сравнению с круглой трубой. Основные геометрические характеристики однозаходных винтообразных труб представлены в табл. 1.

Результаты исследований теплообмена и аэродинамического сопротивления винтообразных труб представлены в работах [12-14].



Рисунок 1 – Винтообразные трубы с равноразвитой поверхностью

Таблица 1 – Геометрические характеристики винтообразных труб

| Наименование параметра | Обозн. | Тип труб | |
|--------------------------------------|---------------------------------|----------|---------|
| | | Тип 1 | Тип 2 |
| Внешний диаметр труб | D , мм | 38 | 38 |
| Внутренний диаметр труб | d , мм | 28 | 31 |
| Шаг между выступами | t , мм | 12 | 8 |
| Высота выступа | h , мм | 5 | 3,5 |
| Коэффициент развития поверхности | ψ | 1,163 | 1,241 |
| Площадь одного погонного метра трубы | $H_{1м}$, м ² /м | 0,13878 | 0,14811 |

Сравнение тепловой эффективности шахматных пакетов винтообразных труб

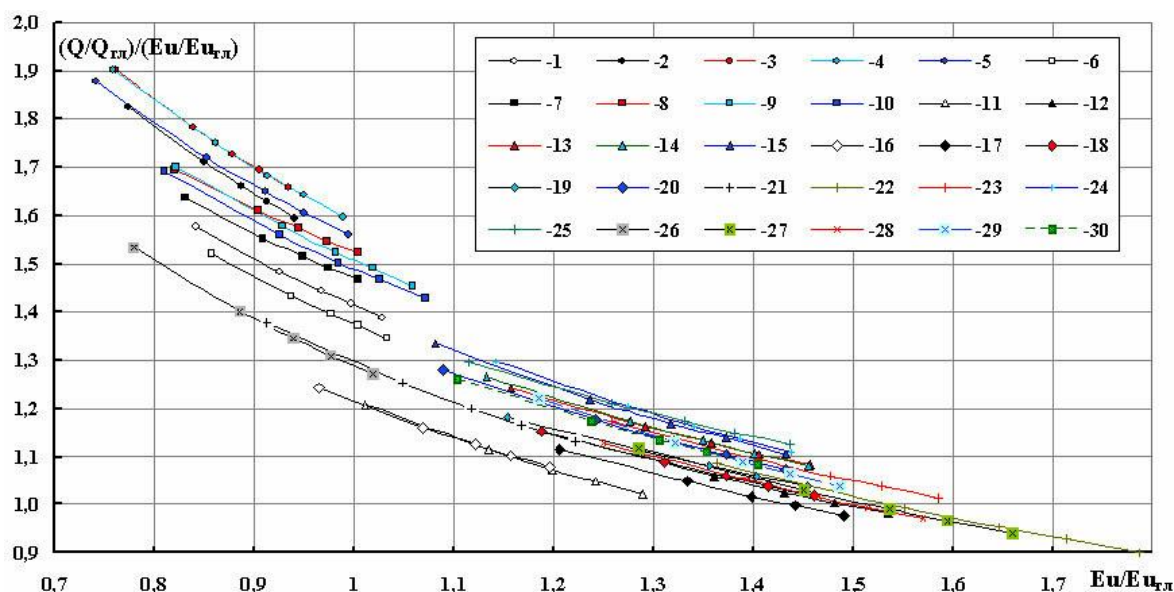
Одним из способов оценки тепловой эффективности поверхностей является обработка и представление экспериментальных данных в виде графических зависимостей $Nu = f(Re)$ [12-14]. Сравнение зависимостей $Nu = f(S_1/S_2)$ и $Nu = f(Re)$ [13] свидетельствует о том, что лучшими показателями по интенсивности внешнего теплообмена обладают пакеты, состоящие из труб типа 1 с поперечным шагом между ними $S_1 = 52,5$ мм и 70 мм [13]. Но такой способ оценки эффективности основан лишь на сравнении коэффициентов теплоотдачи, которые в исследованных пакетах изменяются в зависимости от геометрических характеристик труб и самих пакетов, а также чисел Рейнольдса.

При разработке различных конструкций теплообменных поверхностей большое внимание уделяют аэродинамическому сопротивлению пакетов, стремясь уменьшить этот показатель. В работе [14] приведены опытные данные в виде зависимостей чисел Эйлера Eu_0 от чисел Рейнольдса Re_D ($Eu_0 = f(Re_D)$) и параметра размещения S_1/S_2 ($Eu_0 = f(S_1/S_2)$) для шахматных пакетов винтообразных труб и для сравнения расчетные зависимости для шахматных пакетов круглых труб. Анализ приведенных в [14] графических зависимостей свидетельствует о том, что пакеты винтообразных труб, в которых поперечный шаг S_1 равнялся 42 мм, для обоих типов труб имеют аэродинамическое сопротивление на (15-25) % больше, чем пакеты труб с поперечным шагом S_1 52,5 мм и 70 мм. Очевидно, что такое положение ухудшает эксплуатационные характеристики пакетов с шагом $S_1 = 42$ мм и приводит к увеличению мощности вентилятора (или дымососа) на преодоление сопротивления теплообменной поверхности, состоящей из таких пакетов. В то же время, пакеты труб с $S_1 = 42$ мм имеют меньшее аэродинамическое сопротивление на (5-20)% (в зависимости от чисел Рейнольдса), чем соответствующие пакеты круглых труб. В свою очередь, пакеты винтообразных труб с поперечными шагами $S_1=52,5$ мм и 70 мм, обладающие меньшим аэродинамическим сопротивлением по сравнению с пакетами труб с поперечным шагом $S_1 = 42$ мм, имеют аэродинамическое сопротивление на (10-60) % больше (в зависимости от чисел Рейнольдса), чем у соответствующих им по геометрическим характеристикам шахматных пакетов круглых труб.

Таким образом, из всего вышесказанного нельзя однозначно определить, какой из исследованных пакетов наиболее выгоден в качестве поверхности теплообмена, как по теплопередающим параметрам, так и по аэродинамическому сопротивлению. Широко распространенный метод выявления наиболее эффективной теплообменной поверхности по фактору аналогии Рейнольдса [7,8], на наш взгляд, также не дает полной информации о преимуществах той или иной сравниваемой поверхности, т.к., не учитывает увеличения или уменьшения площади интенсифицированной поверхности по сравнению с эталонной из круглых гладких труб.

В связи с этим, авторами предложен усовершенствованный метод выбора наиболее эффективной поверхности, основанный на сравнении тепловых потоков, которые отдаются или воспринимаются единицей площади каждой из сравниваемых поверхностей при одинаковом температурном напоре Δt и который учитывает развитие поверхности ($Q = \alpha \cdot H \cdot \Delta t$). Чем больше количество теплоты, отведено или воспринято поверхностью, тем поверхность теплообмена будет более эффективна при одинаковом температурном напоре.

Представленные на рис.2 данные из [13, 14], построенные в виде графических зависимостей $(Q/Q_{\text{гл}})/(Eu/Eu_{\text{гл}}) = f(Eu/Eu_{\text{гл}})$ для области чисел Рейнольдса $(5 - 80) \cdot 10^3$ и 30 пакетов винтообразных труб, свидетельствуют о том, что наиболее эффективными пакетами по фактору $(Q/Q_{\text{гл}})/(Eu/Eu_{\text{гл}})$ являются пакеты обоих типов труб с поперечным шагом между трубами $S_1 = 42$ мм.



1-5 – пакеты труб типа 1, $S_1 = 42$ мм; 6-10 – пакеты труб типа 2, $S_1 = 42$ мм;
11-15 – пакеты труб типа 1, $S_1 = 52,5$ мм; 16-20 – пакеты труб типа 2, $S_1 = 52,5$ мм;
21-25 – пакеты труб типа 1, $S_1 = 70$ мм; 26-30 – пакеты труб типа 2, $S_1 = 70$ мм

Рисунок 2 – Зависимость $(Q/Q_{\text{гл}})/(Eu/Eu_{\text{гл}}) = f(Eu/Eu_{\text{гл}})$ при внешнем поперечном омывании шахматных пакетов труб из [13, 14]

При проектировании теплообменников разработчики и конструкторы уделяют большое внимание вопросу компактности поверхностей нагрева, которая является залогом высокой энергетической эффективности поверхностей теплообмена. Под компактностью Π ($\text{м}^2/\text{м}^3$) подразумевается отношение полной внешней площади поверхности теплообменника к объему, который он занимает. За счет развития площади поверхности винтообразных труб (табл.1), компактность пакетов из таких труб по сравнению с пакетами из гладких труб увеличивается на 16% для труб типа 1 и на 24% для труб типа 2.

Наиболее выгодной компоновкой труб в пакете, учитывая параметр компактности пакета, являются пакеты труб типа 1 и труб типа 2 (табл.1) с поперечным и продольным шагами между трубами $S_1 = 42$ мм, $S_2 = 45$ мм и коэффициентами развития поверхности $\psi = 1,163$ и $1,241$ соответственно.

Используя методику оценки, сравнения и выбора наиболее эффективной поверхности из [12, 15], проведен теплоаэродинамический расчет воздухоподогревателя-регенератора для газотурбинной установки в котором в качестве теплообменных элементов использованы винтообразные трубы типов 1 и 2 (табл. 1) с шагами между трубами $S_1 = 42$ мм, $S_2 = 45$ мм. Для сравнения проведен расчёт аналогичного регенератора с круглыми трубами, имеющими $D = 38$ мм с такими же шагами между трубами, как и для теплообменника из винтообразных труб. Режимные параметры воздухоподогревателя-регенератора принимались одинаковыми для всех сравниваемых пакетов (таблица 2). В качестве основных показателей эффективности при сравнении трубчатых поверхностей приняты: потери давления в воздушном $\Delta P_{\text{в}}$, (Па) и газовом $\Delta P_{\text{г}}$, (Па) трактах регенератора; коэффициент теплопередачи k ($\text{Вт}/(\text{м}^2\text{К})$), плотность теплового потока единицы длины труб q_l ($\text{Вт}/\text{м}$), общая длина труб L (км), масса труб M (т), объем V (м^3) регенератора. Результаты сравнительных расчетов представлены в таблице 3.

Таблица 2 – Параметры воздухоподогревателя-регенератора газотурбинной установки

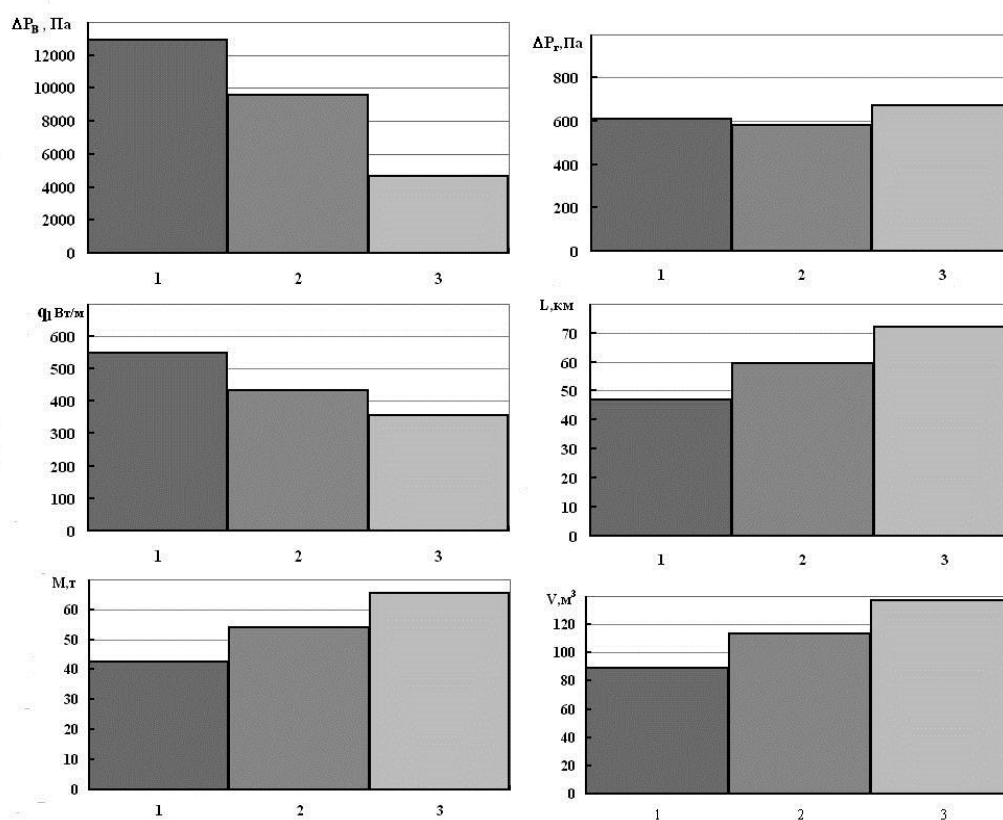
| Наименование параметра | Значение |
|--|-------------|
| Тепловая мощность регенератора Q , МВт | 25,5 |
| Расход воздуха на входе в регенератор G_B , кг/с | 74,7 |
| Температура воздуха на входе в регенератор T_1 , °С | 204 |
| Температура воздуха на выходе из регенератора T_2 , °С | 526 |
| Давление воздуха на входе в регенератор, P_B , кгс/см ² | 5,12 |
| Потери давления в регенераторе по воздушному тракту, % | 3,0 |
| Расход дымовых газов на входе в регенератор G_T , кг/с | 79,1 |
| Температура дымовых газов на входе в регенератор θ_1 , °С | 583 |
| Температура дымовых газов на выходе из регенератора θ_2 , °С | 304 |
| Давление дымовых газов на входе в регенератор, P_T кгс/см ² | 1,065-1,070 |
| Степень регенерации μ | 0,85 |

Таблица 3 – Результаты расчётов показателей эффективности воздухоподогревателя-регенератора

| Тип труб | ΔP_B | ΔP_T | k | q_l | L | M | V |
|----------|--------------|--------------|---------------------|-------|------|------|----------------|
| | Па | Па | Вт/м ² К | Вт/м | км | т | м ³ |
| 1 | 12900 | 600 | 66,4 | 550 | 47,0 | 42,5 | 89,3 |
| 2 | 9610 | 582 | 48,9 | 432 | 59,5 | 54,0 | 113,4 |
| 3 | 4650 | 675 | 45,1 | 357 | 72,0 | 65,3 | 137,0 |

Примечание: 3 - пакет гладких круглых труб

Для большей наглядности и простоты сравнения показателей вариантных теплоаэродинамических расчетов регенератора на рис.3 в виде диаграмм представлены данные расчетов основных показателей, которые приведены в таблице 3.



1 – пакет винтообразных труб типа 1: $S_1 = 42$ мм, $S_2 = 45$ мм;
 2 – пакет винтообразных труб типа 2: $S_1 = 42$ мм, $S_2 = 45$ мм;
 3 – пакет круглых труб: $S_1 = 42$ мм, $S_2 = 45$ мм

Рисунок 3 – Показатели эффективности поверхностей

Анализ проведенных расчётов показателей эффективности регенератора с теплообменными поверхностями из трех типов труб показывает, что по сравнению с теплообменными поверхностями из традиционных труб круглого поперечного сечения, винтообразные трубы имеют ряд преимуществ. Очевидно (табл. 3, рис. 3), что винтообразные трубы позволяют получить более высокие значения коэффициента теплопередачи k и линейной плотности теплового потока q_l . Кроме этого, их использование даёт возможность уменьшить длину труб (L), а также улучшить массогабаритные показатели (M , V) воздухоподогревателя-регенератора, которые снижаются в 1,5 для пакета из труб типа 1 и в 1,2 раза для пакета из труб типа 2, соответственно. Несмотря на то, что потери давления по воздушному тракту ΔP_V в регенераторе из винтообразных труб в несколько раз выше, чем из труб круглого сечения, их величина не превышает 3% от суммарных потерь в обоих трактах регенератора [16], что соответствует 15-20 кПа. Что касается требований к величине аэродинамического сопротивления по газовому тракту ΔP_G , то для всех сравниваемых поверхностей аэродинамическое сопротивление выхлопных газов составляет менее 1500 Па, что также находится в пределах рекомендаций [16].

Выводы

Проведенные исследования теплообмена и аэродинамического сопротивления шахматных пакетов винтообразных труб с равноразвитой поверхностью показали, что они обладают рядом преимуществ в сравнении с трубами традиционно круглого сечения. Эти преимущества в виде теплоаэродинамических и массо-габаритных показателей эффективности, подтвержденные также результатами теплоаэродинамического расчета теплообменных поверхностей воздухоподогревателя-регенератора, показали техническую перспективность и экономическую целесообразность применения винтообразных труб для создания различного энергетического оборудования.

Список использованной литературы

1. Кирпичев, М. В. О невыгоднейшей форме поверхности нагрева [Текст] / М. В. Кирпичев // Известия энергетического института им. Кржижановского. 1944. – Т. XII. – С. 5-9.
2. Антуфьев, В. М. Эффективность различных форм конвективных поверхностей нагрева [Текст] / В. М. Антуфьев – М.-Л.: Энергия, 1966. – 184с.
3. Калинин, Э. К. Интенсификация теплообмена в каналах [Текст] / Э. К. Калинин, Г. А. Дрейцер, С. А. Ярхо – М.: Машиностроение, 1990. – 208 с.
4. Юдин, В. Ф. Теплообмен поперечно-оребранных труб [Текст] / В. Ф. Юдин – Л.: Машиностроение, 1982.-189с.
5. Гухман, А. А. Интенсификация конвективного теплообмена и проблема сравнительной оценки теплообменных поверхностей [Текст] / А. А. Гухман // Теплоэнергетика. – 1977. – №4 – С. 5-8.
6. Дрейцер, Г. А., Дзюбенко, Б. В., Якименко, Р.И. Интенсификация теплообмена и анализ методов сравнения теплогидравлической эффективности теплопередающих поверхностей [Текст] // Интенсификация теплообмена: Тр. Второй Рос. нац. конф. по теплообмену. М.: Изд-во МЭИ. 1998. – С. 99-102.
7. Халатов, А. А. Теплообмен и гидродинамика около поверхности углублений (лунок) [Текст] / А. А. Халатов – Киев: Изд. Ин-та технической теплофизики НАН Украины, 2005. – 140 с.
8. Доник, Т. В. Теплогидравлическая эффективность и качество интенсификаторов теплообмена закручивающего типа [Текст] / Т. В. Доник, А. А. Халатов // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2012. – №3/10(57). – С. 43-46.
9. Wang, B. G. An experimental investigation of heat transfer and friction loss in taper pin fin configuration of air cooled turbine blades [Text] / B. G. Wang, H. H. Ji // Proceeding of the ASME-JSME Thermal Engineering Joint Conference. – 1987. – Vol. 4. – pp. 127-133.
10. Uzol, O. Elliptical Pin Fins as an Alternative to Circular Pin Fins for Gas Turbine Blade Cooling Applications. Part 1: Endwall Heat Transfer and Total Pressure Loss Characteristics [Text] / O. Uzol, C. Camci // Proceedings of ASME Turbo Expo 2001 International Gas Turbine Institute Conference, New Orleans, LA. – 2001, June 4-7. – 13 p.
11. Pis'mennyi, E. N. Ways for Improving the Tubular Heaters Used in Gas Turbine Units [Текст] / E. N. Pis'mennyi // Thermal Engineering. – 2012. – V.59. - №6. – pp.485-490.
12. Демчук, Л. В. Теплоаеродинамічна ефективність гвинтоподібних труб з рівнорозвиненою поверхнею [Текст] /Л. В. Демчук, В. А. Рогачов, О. М. Терех, О. І. Руденко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2011. – №5/8 (53). – С. 26-30.
13. Письменный, С. М. Теплообмін пучків труб з рівнорозвиненою поверхнею [Текст] / С. М. Письменный, В. А. Рогачов, О. М. Терех, В. І. Коньшин, Д. С. Омельчук // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – №1/8 (60). – С. 29-33.

14. Письменный, Е. Н. Обобщение данных по аэродинамическому сопротивлению пакетов винтообразных труб [Текст] / Е. Н. Письменный, С. А. Рева, А. М. Терех, А. И. Руденко // Международный научно-исследовательский журнал. – 2014. – Ч.1. – №5 (24). – С. 103-106.

15. Багрий, П. И. Сравнение тепловой эффективности шахматных пучков поперечно-оребранных труб различного профиля [Текст] / П. И. Багрий, А. М. Терех, В. А. Рогачев // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2007. – №6/5 (30). – С. 51-56.

16. Костюк, А. Г. Паровые и газовые турбины для электростанций [Текст] / А. Г. Костюк, В. В. Фролов, А. Е. Булкин, А. Д. Трухний. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008. – 556 с.

S. Reva, engineer ORCID 0000-0003-0226-706X

A. Terekh, Ph.D., ORCID 0000-0002-1320-8594

V. Rogachov, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof. ORCID 0000-0001-5489-874X

A. Rudenko, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof. ORCID 0000-0002-8541-9710

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

ESTIMATION OF HEATAERODYNAMIC EFFICIENCY OF SCREWING TUBE BUNDLES

On the basis of the improved method, the heat and aerodynamic efficiency of the staggered bundles of screwing and smooth round tubes was evaluated. A comparison is made of their heat-aerodynamic, weight, and overall characteristics by the example of heat and aerodynamic calculations of the air heater-regenerator. Based on the results of the comparative analysis, the advantages of screw-shaped tubes with an equally developed heating surface over the surfaces of traditional tubes of circular cross-section are shown.

Keywords: screwing tube, bundles, surface, effectiveness, regenerator, calculation, comparison.

References

1. Kirpichov, M. V. (1944). *O naivugodneishei forme poverkhnosti nagreva. Izvestia energeticheskogo instituta im. Krzgziganovskogo*, V.XII, 5-9.
2. Antuf'ev, V. M. (1966). Efficiency of different forms of heating convective surfaces. Moscow, USSR: Energy, 184.
3. Kalinin, E. K., Dreizer, G. A., Jarkho, S. A. (1990). Intensification of heat transfer in chanel. Moscow, USSR: Machinebuilding, 208.
4. Udin, V. F. (1982). Heat transfer of finned tubes in crossflow. Leningrad, USSR: Machinebuilding, 189.
5. Gukhman, A. A. (1977). Intensification of convective heat transfer and problem of comparative estimation of heat-exchange surfaces. *Thermal Engineering*, 4, 5–8.
6. Dreytser, G. A., Dzyubenko, B. V., Yakimenko, R. I. (1998). Intensification of heat transfer and analysis methods of comparison of heat hydraulic efficiency for heat transfer surfaces. Intensification of heat transfer: Labours of the II Russian national conference of heat transfer. Moscow, Russia: Publishing house MEI, 6, 99–102.
7. Khalatov, A. A. (2005). Heat exchange and hydrodynamics near the surface of deepenings (small holes), Kiev, Ukraine: Publ. Inst. Tekhnical Thermalphysics NAS Ukraine, 140.
8. Donik, T. V., Khalatov, A. A. (2012). Thermhydraulic efficiency of heat exchange and the quality of intensifiers such as torsional. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3/10 (57), 43-46.
9. Pis'mennyi, E. N. (2012). Ways for Improving the Tubular Heaters Used in Gas Turbine Units. *Thermal Engineering*, V.59, 6, 485-490.
10. Wang, B. G., Ji, H. H. (1987). An experimental investigation of heat transfer and friction loss in taper pin fin configuration of air cooled turbine blades. *Proceeding of the ASME-JSME Thermal Engineering Joint Conference*, Vol. 4, 127-133.
11. Uzol, O., Camci C. (2001). Elliptical Pin Fins as an Alternative to Circular Pin Fins for Gas Turbine Blade Cooling Applications Part 1: Endwall Heat Transfer and Total Pressure Loss Characteristics. *Proceedings of ASME Turbo Expo 2001 International Gas Turbine Institute Conference, New Orleans, LA*, June 4-7, 13.
12. Demchuk, L. V., Rohachov, V. A., Terekh, A. M., Rudenko, A. I. (2011). Heat-aerodynamic efficiency of helical tubes with equaldeveloped surface. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5/8 (53), 26-30.
13. Pis'mennyi, E. N., Rogachov, V. A., Terekh, A. M., Kon'shin, V. I., Omelchuyk, D. S. (2013). Heat transfer of tube bundles with the equalincreased surfaces. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1/8 (61), 29-33.

14. Pis'mennyi, E. N., Reva S. A., Terekh, A. M., Rudenko, A. I. (2014). The generalized data of the aerodynamic drag of the staggered bundles of screw-shaped tubes. *International research journal*, V.1, 5 (24), 103-106.

15. Bagriy, P. I., Terekh, A. M., Rohachov, V. A. (2007). *Sravnienie teplovoy effektivnosti shakhmatnykh puchkov poperechno-orebrennykh trub razlichnogo profilia. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, №6/5 (57), 51-56.

16. Kostyuk, A. G., Frolov, V. V., Bulkin, A. E., Trukhniy A. D. (2008). Steam and gas turbines for power station. Moscow, Russia: Publ. House MEI, 556.

УДК 621.18.063

С.А. Рева, інженер, **ORCID 0000-0003-0226-706X**

О.М. Терех, канд. техн. наук., с. н. с., **ORCID 0000-0002-1320-8594**

В. А. Рогачов, канд. техн. наук., доц., **ORCID 0000-0001-5489-874X**

О.І. Руденко, канд. техн. наук, доц., **ORCID 0000-0002-8541-9710**

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ОЦІНКА ТЕПЛОАЕРОДИНАМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ПАКЕТІВ ГВИНТОПОДІБНИХ ТРУБ

На основі вдосконаленого метода виконана оцінка теплоаеродинамічної ефективності шахових пакетів гвинтоподібних та гладких круглих труб. Проведено порівняння їх теплоаеродинамічних, вагових, габаритних характеристик на прикладі теплового і аеродинамічного розрахунків повітропідігрівача-регенератора. За результатами порівняльного аналізу показані переваги гвинтоподібних труб над поверхнями з традиційних труб круглого перетину.

Ключові слова: гвинтоподібна труба, поверхня, пакет, ефективність, регенератор, розрахунок, порівняння.

Надійшла 26.03.2018

Received 26.03.2018

УДК 621.315.615

Д.Т. Юсупов, ст. науч. сотр.,

ООО «Научно-технический центр» АО «Узбекэнерго»,

г. Ташкент, Республика Узбекистан

ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ ПРИМЕСЕЙ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ ПРОЧНОСТЬ ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА И СПОСОБ ИХ УДАЛЕНИЯ

Электрическая прочность трансформаторного масла является самым основным эксплуатационным показателем, определяющий срок службы жидкой изоляции. В процессе эксплуатации трансформаторного масла на его электрическую прочность влияют различные примеси. В связи с этим, в данной работе проведен обзор влияющих примесей на данный основной эксплуатационный показатель масла. Приведены результаты очистки отработанных трансформаторных масел с целью повышения их электрическую прочность.

Для проведения экспериментальных исследований разработан керамический мембранный фильтр, предназначенный для очистки отработанного трансформаторного масла от механических примесей. Очистка отработанных трансформаторных масел растворимых и увлажненных примесей применен адсорбционный способ. В качестве адсорбентов использован силикагель и цеолит. Очистка отработанных трансформаторных масел с использованием керамического мембранного фильтра и адсорбентов осуществлялась по разработанной схеме автором. Окончательная очистка каждой пробы масла керамическим мембранным фильтром позволила повысить значение пробивного напряжения до 60 кВ.

© Д.Т. Юсупов, 2018

Ключевые слова: отработанное трансформаторное масло, механические примеси, растворимые примеси, увлажненные примеси, электрическая прочность, пробивное напряжение, керамический фильтр, адсорбенты.

Введение

Надежные и долговременные эксплуатации маслonaполненных трансформаторов, во многом зависят от качества масла. Качества масла также определяет продолжительность безотказной работы масляных трансформаторов.

Основные влияющие факторы на эксплуатационные характеристики свойства трансформаторного масла являются различные примеси. Самым основным влияющим фактором на эксплуатационные характеристики трансформаторного масла является механические (твердые) примеси.

Механические примеси являются нерастворенными веществами, содержащиеся в масле в виде осадка или во взвешенном состоянии. Это – уголь, волокна, частицы металла и другие виды механических примесей. Одним из опасных видов механических примесей в трансформаторном масле является уголь. Электрическая дуга, горящая вблизи поверхности масла, образует уголь, обладающий хорошей проводимостью, который снижает его пробивное напряжение. Дуга высокого напряжения при малой силе тока, горящая под толстым слоем масла, дает тонкую угольную пыль, почти не оседающую на дно. Дуга низкого напряжения при большой силе тока дает крупные хлопья угля, оседающие на всех поверхностях трансформатора [1]. Следующими наиболее распространенными примесями являются волокна, попадающие в масло из изолирующих материалов (целлюлозная изоляция) выемной части трансформатора. Волокна целлюлозной изоляции оказывают свое вредное действие на электрическую прочность трансформаторного масла, и проявляют это особенно сильно во влажном масле. В сухом масле волокна на пробивное напряжение влияют слабо. Большое значение имеет структура и размер волокон: крупные волокна целлюлозной изоляции меньше снижают пробивное напряжение, чем мелкие хлопчатобумажные. По мере старения в масле накапливается шлам, который, оседаясь на изоляцию силового трансформатора, ухудшает ее эксплуатационные характеристики [2]. Шлам, накопившийся на поверхности обмоток, отводах, шинах, в масляных каналах трансформатора, ухудшает процессы теплопередачи и, соприкасаясь с целлюлозной изоляцией, ускоряет её старение. Вполне реально опасность образования из частиц шлама проводящих мостиков в изоляции трансформаторов, что непременно приводит к уменьшению её электрической прочности.

Исследованиями последних лет выявлено [3], что механические примеси, имеющие размер менее 5 мкм, являются наиболее опасными для функционирования трансформатора, так как они представляют примерно 95% от общего числа загрязнителей в масле, являются в основном продуктами окисления масла и базой для образования более крупных частиц. Эти загрязнители полярны и имеют свойство притягиваться и налипать на внутренние поверхности трансформатора по достижению маслом определенного уровня загрязненности. В процессе эксплуатации трансформатора наблюдается процесс укрупнения частиц, называемый «хлопьеобразованием». При этом содержание частиц размером >50 мкм может увеличиться в несколько раз по сравнению с первоначальным содержанием. Опасность загрязнений размером менее 5 мкм заключается в их высокой способности проникать внутрь твердой изоляции и менять их эксплуатационные характеристики.

Для оценки загрязненности трансформаторного масла механическими примесями используется стандартная методика по ГОСТ 6370-83 [4], которая предусматривает фильтрацию масла через бумажный фильтр и весовое определение общего количества фильтрата. Однако, указанный метод не даёт возможности оценить общий диапазон размеров частиц и тем более их распределение по нескольким выбранным диапазонам размеров. Эта методика также не даёт возможности классифицировать чистоту масла по принятым классам чистоты ГОСТ 17216-2001 [5]. Между тем, электрическая прочность масла существенным образом зависит не только от количества, но и от размеров частиц.

Данные о фактически наблюдаемых размерах частиц механических примесей в масле трансформаторов при введении в работу и при эксплуатации в литературе практически отсутствуют.

Следующим основным влияющим фактором на эксплуатационные характеристики трансформаторного масла является растворимые примеси. Растворимые примеси - это продукты окислительного старения масла. В процессе длительной эксплуатации трансформаторного масла происходит укрупнение коллоидных частиц, которые наблюдаются уже у заводского масла. Коллоидными частицами, накапливающимися в масле, являются кислые продукты, не содержащие в своем составе металлы, например, смолы, компоненты лака и другие продукты окисления [2]. Появление коллоидных частиц снижает пробивное напряжение трансформаторного масла. Кислоты, которые переходят в жидкий диэлектрик из пленок лаков, ускоряют процесс окисления трансформаторного масла [2]. Асфальто-смолистые растворимые примеси представляют собой порошок темно-коричневого или бурого цвета, происходят от окисления нафтеновых смол. Основная их вредность в том, что, отлагаясь на обмотках, они

ухудшают процесс охлаждения трансформатора [1-2]. Мыловые осадки от светлого до темно-бурого цвета, образуются от взаимодействия металлов и кислот. Эти осадки при взаимодействии с водой представляют большую опасность, так как могут быть причиной перекрытия или пробоя внутри трансформаторов.

Последним основным влияющим фактором на эксплуатационные характеристики трансформаторного масла является увлажненные примеси (вода).

Вода в трансформаторное масло проникает от атмосферы или может развиваться как продукт химических реакций в самом трансформаторе. Основным показателем трансформаторного масла является электрическая прочность - величина, чрезвычайно чувствительная к его увлажнению. Незначительное количество воды может иметь значительное влияние к особенностям эксплуатации трансформатора. Например, если содержание воды в трансформаторном масле превышает 50 г/т, тогда может возникнуть пробой, что приводит к выходу трансформатора из строя [6]. В зависимости от содержания влаги в трансформаторном масле вода может находиться в трёх состояниях.

Эмульсионная вода состоит из мелких капель жидкости. Она трудно отделяется от трансформаторного масла и находится в его химическом составе. Капельки данной воды под действием электрического поля могут выстраиваться в цепочки и образовывать проводящие мостики [7], и вследствие этого, данный тип воды может оказать влияние на пробивное напряжение трансформаторного масла. Пробивное напряжение масла является показателем, характеризующим способность жидкого диэлектрика выдерживать приложенное напряжение без пробоя.

На процесс старения трансформаторного масла оказывает влияние смесь различных примесей (особенно частиц меди и других металлов, целлюлозных волокон, коллоидных частиц), причем их совместное влияние на эксплуатационные свойства трансформаторного масла намного сильнее, чем влияние одного из этих факторов в отдельности [8].

Объекты и методы исследований.

Пробивное напряжение каждой пробы трансформаторного масла до и после каждой очистки проверялось с помощью измерительного аппарата электрической прочности диэлектрических жидкостей типа АМИ-60. Средние значения полученных экспериментальных данных по пробивному напряжению отработанных трансформаторных масел до очистки приведены в таблице 1.

Таблица 1. – Средние арифметические значения пробивных напряжений отработанных трансформаторных масел (ОТМ)

| Номер пробы ОТМ | Пробивное напряжение ОТМ до очистки, кВ |
|--------------------|--|
| Проба №1 | 22,8 |
| Проба №2 | 26,6 |
| Проба №3 | 32 |
| Проба №4 | 35,5 |
| Проба №5 | 31,2 |

Испытание производилось в специальном фарфоровом сосуде, который заполнен пробами отработанного трансформаторного масла объемом 500 мл. Перед испытанием расстояние между электродами установили $h=2,5$ мм. Испытание на пробивное напряжение проводилось также 6 раз согласно нормативному документу РН 34-301-633:2011 [9].

Среднее арифметическое значение пробивного напряжения отработанного трансформаторного масла до и после очистки вычисляли по формуле [10]:

$$U_{пр} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_{пр,i} \quad (1)$$

где $U_{пр}$ - пробивное напряжение (среднее арифметическое значение), кВ; $U_{пр,i}$ - величина, полученная при последовательных пробоях, кВ; n - число пробоев.

Для проведения экспериментальных исследований разработан керамический мембранный фильтр, предназначенный для очистки отработанного трансформаторного масла от механических примесей. Очистка отработанных трансформаторных масел растворимых и увлажненных примесей применен адсорбционный способ. В качестве адсорбентов использован силикагель и цеолит.

Очистка отработанных трансформаторных масел с использованием керамического мембранного фильтра и адсорбентов осуществлялась по схеме, приведенной в [11].

Экспериментальные данные и обсуждение результатов исследования.

Получены результаты испытания отработанного трансформаторного масла каждой пробы до и после очистки по пробивному напряжению. Наблюдалось повышение значения пробивного напряжения отработанного трансформаторного масла всех проб после каждого этапа очистки. Значение пробивного напряжения данной пробы после очистки каждой пробы керамическим мембранным фильтром повысилось в среднем на 8-11 кВ. Адсорбционная очистка каждой пробы трансформаторного масла повысила значение пробивного напряжения в среднем до 58 кВ.

Окончательная очистка каждой пробы масла керамическим мембранным фильтром позволила повысить значение пробивного напряжения до 60 кВ.

На рисунке 1 приведены результаты испытания отработанного трансформаторного масла по всем пробам до и после очистки по пробивному напряжению. Из рисунка видно, что очистка керамическим мембранным фильтром показала значительное повышение пробивного напряжения трансформаторного масла. Это объясняется тем, что очистка отработанных трансформаторных масел керамическим мембранным фильтром от механических примесей с минимальными размерами до 0,3 мкм позволила повысить пробивного напряжения значительно.

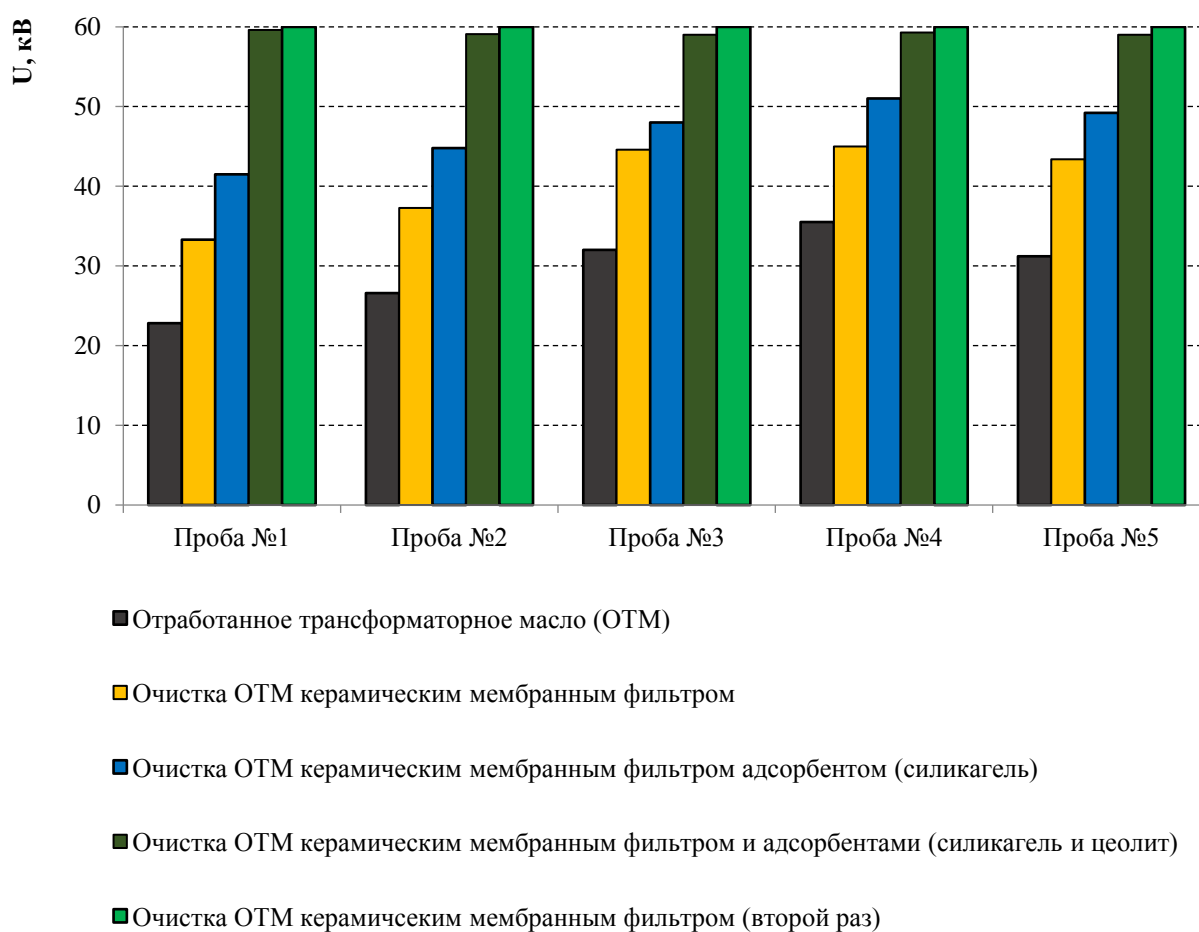


Рисунок 1 – Пробивные напряжения отработанных трансформаторных масел до и после очистки

Выводы:

1. Основным влияющим примесям на электрическую прочность трансформаторного масла являются механические примеси. Поэтому необходимо глубокая очистка отработанных трансформаторных масел от механических примесей.

2. Очистка отработанных трансформаторных масел керамическим фильтром от механических примесей с минимальными размерами до 0,3 мкм позволила повысить электрическую прочность значительно.

3. Комплексная очистка отработанных трансформаторных масел с использованием керамического мембранного фильтра и адсорбентов позволила повысить их эксплуатационные показатели.

Список использованной литературы

1. Липштейн Р.А., Шахнович М.И. Трансформаторное масло. –М.: Энергоатомиздат, 1983 г. - 296с.
2. Маневич Л.О. Обработка трансформаторного масла. 2-е изд., перераб. и доп. –М.: Энергоатомиздат, 1985. - 104с.
3. Курочкин А.С., Курочкин С.А., Львов Е.В., Осадчий В.Л. Метод сверхглубокой очистки трансформаторного масла и маслонеполненного оборудования как способ повышения надежности работы трансформаторов // Международная научно-практическая конференция «Трансформаторы: эксплуатация, диагностирование, ремонт и продление срока службы». г. Екатеринбург. 13-17 сентября 2010 г. С.233-243
4. ГОСТ 6370-83. Нефть, нефтепродукты и присадки. Метод определения механических примесей. – М: Стандартинформ, 2007. – 7 с.
5. ГОСТ 17216-2001. Межгосударственный стандарт чистота промышленная. Классы чистоты жидкостей. – Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2003 г., 11 с.
6. Суслин М.А., Тетушкин В.А., Чернышов В.Н., Дмитриев Д.А. Микроволновой термовлагодетрический метод контроля органических соединений. Вестник ТГТУ. 2004 г. №2. С.28-31.
7. Попов Г.В. Вопросы диагностики силовых трансформаторов// ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет». – Иванова, 2012г. -176 с.
8. Маневич Л.О. Сушка масла цеолитами и дегазация. -2-е изд., перераб. и доп. –М.: Энергия, 1980. -168 с.
9. Руководящий документ РН 34-301-633:2011. Инструкция. Эксплуатация трансформаторных масел. – Т: Узбекэнерго, – 2011. – 98 с.
10. ГОСТ 6581-75. Материалы электроизоляционные жидкие. Методы электрических испытаний. – М: Стандартинформ, 2008. – 18 с.
11. Салихов Т.П., Кан В.В., Юсупов Д.Т. Разработка технологической схемы мобильной установки для очистки масла и целлюлозной изоляции силового трансформатора с использованием керамических мембран // Общегосударственный научно-производственный и информационный журнал “Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит” (Украина). 2017 г. №01 (156). С. 44-49.

УДК 621.315.615

Д.Т. Юсупов, старш. наук. співроб.,
ТОВ «Науково-технічний центр» АТ «Узбекэнерго»,
м. Ташкент, Республіка Узбекистан

**ВПЛИВ РІЗНИХ ВИДІВ ДОМІШОК НА ЕЛЕКТРИЧНУ МІЦНІСТЬ ТРАНСФОРМАТОРНОЇ
ОЛИВИ ТА СПОСІБ ЇХ ВИДАЛЕННЯ**

Електрична міцність трансформаторної оливи є основними експлуатаційними показниками, що визначає термін служби рідкої ізоляції. В процесі експлуатації трансформаторного масла на його електричну міцність впливають різні домішки. У зв'язку з цим, в даній роботі проведено огляд впливають домішок на даний основний експлуатаційний показник масла. Наведено результати очищення відпрацьованих трансформаторних масел з метою підвищення їх електричну міцність.

Для проведення експериментальних досліджень розроблений керамічний мембранний фільтр, призначений для очищення відпрацьованого трансформаторного масла від механічних домішок. Очищення відпрацьованих трансформаторної оливи розчинних і зволожених домішок застосований адсорбційний спосіб. Як адсорбенти використаний силікагель і цеоліт. Очищення відпрацьованих трансформаторних оливи з використанням керамічного мембранного фільтру і адсорбентів здійснювалася за розробленою схемою автором. Остаточне очищення кожної проби оливи керамічним мембранним фільтром дозволила підвищити значення пробивної напруги до 60 кВ.

Ключові слова: відпрацьоване трансформаторна олива, механічні домішки, розчинні домішки, зволожені домішки, електрична міцність, пробивна напруга, керамічний фільтр, адсорбенти.

D. Yusupov, SRF
LLC "Scientific and Technical Center" JSC "Uzbekenergo"
Tashkent, Republic of Uzbekistan

INFLUENCE OF VARIOUS IMPURITIES ON ELECTRIC STRENGTH OF TRANSFORMER OIL AND METHOD OF REMOVAL

The electrical strength of transformer oil is the most basic performance indicator, which determines the service life of liquid insulation. In the process of operation of transformer oil, its electrical strength is affected by various impurities. In this regard, in this paper, a review of the influencing impurities on this basic oil performance indicator has been made. The results of purification of waste transformer oils with the purpose of increasing their electrical strength are given.

A ceramic membrane filter designed for cleaning spent transformer oil from mechanical impurities was developed for carrying out experimental studies. Purification of waste transformer oils of soluble and moistened impurities is applied by the adsorption method. Silicagel and zeolite are used as adsorbents. Purification of waste transformer oils using a ceramic membrane filter and adsorbents was carried out according to the developed scheme by the author. The final cleaning of each oil sample with a ceramic membrane filter allowed to increase the breakdown voltage up to 60 kV.

Key words: used transformer oil, mechanical impurities, soluble impurities, wet impurities, electrical strength, breakdown voltage, ceramic filter, adsorbents.

Надійшла 14.06.2018
Received 14.06.2018

УДК 621.3:614.8

Є.А. Бондаренко, д-р техн. наук, доц
Т.В. Андрієнко, студент;
Д.С. Кушнір, студент
Вінницький національний технічний університет

ОЦІНЮВАННЯ ПРОФЕСІЙНИХ РИЗИКІВ ЕЛЕКТРОТРАВМАТИЗМУ ДЛЯ ПЕРСОНАЛУ ЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ ТА СИСТЕМ

Розглянуто найбільш розповсюджені підходи та методи оцінювання ризику. Розроблено класифікацію методів кількісного оцінювання ризику електротравм. Це дозволило проводити теоретичні дослідження причинно-наслідкових зв'язків щодо ризику електротравм та професійних захворювань для персоналу, який обслуговує електроустановки надвисоких класів напруги від дії електричної енергії та запропонувати метод для його оцінювання. Запропонований матричний метод оцінювання ризику, на відміну від відомих, виділяє 36 різновидів ризику у вигляді значень для бінарних груп «імовірність нещасного випадку – важкість травматичної події від дії електричної енергії». Якісні та кількісні показники матриці оцінки ризику дозволяють робити об'єктивні висновки щодо залежності небезпеки впливу електричного поля промислової частоти на персонал і трансформувати отримані оцінки в адекватні і адресні профілактичні заходи для технологічних робіт в електроустановках 330, 500, 750 кВ.

Ключові слова: електрична станція, енергія, електричне поле, менеджмент, ризик, електробезпека.

© Є.А. Бондаренко, Т.В. Андрієнко, Д.С. Кушнір, 2018

Вступ. Сьогодні актуальним є: приведення нормативно-правової бази України в галузі електробезпеки у відповідність до сучасних вимог законодавства Європейського Союзу (ЄС) з урахуванням оцінювання професійних ризиків електротравмування й захисту здоров'я працівників в умовах виробничого середовища. Оцінювання вказаного ризику передбачають стандарти OHSAS 18001:2007, ISO 50001:2011, основна директива Європейського Союзу 89/391/ЄЕС та підпорядковані їй спеціальні директиви з безпеки праці на робочих місцях (89/654/ЄЕС, 89/655/ЄЕС, 90/269/ЄЕС та ін.).

Професійний ризик визначається як величина ймовірності порушення (ушкодження) здоров'я з урахуванням тяжкості наслідків у результаті несприятливого впливу факторів виробничого середовища і трудового процесу. На даний час, оцінювання професійного ризику особливо важливе значення має для електротехнічного персоналу, що обслуговує електричні станції та системи надвисоких класів напруги (НВН), тобто напругою 330, 500, 750 кВ. Це обумовлено по перше тим, що діяльність персоналу в електроустановках НВН пов'язана з деяким початковим ризиком електротравмування та професійного захворювання від дії електромагнітного поля промислової частоти (ЕП ПЧ). По друге – зараз на електричних станціях, підстанціях, на підприємствах електричних мереж НВН в експлуатації знаходиться велика кількість силового та комутаційного обладнання, яке відпрацювало чимало років і потребує реконструкції та збільшення кількості проведення ремонтних робіт, що також призводить до підвищення ризику електротравматизму [1]. За стратегію удосконалення системи електробезпеки електроустановок НВН доцільно прийняти метод мінімізації ризику електротравм, відповідно до якого «Будь-який ризик повинен бути знижений настільки, наскільки це є практично розумно досяжним».

Відомі методи оцінювання рівня електробезпеки [2–4] базуються на порівнянні вимірних розрахункових значень напруженості електромагнітного поля, напруги дотику, струму, що проходить через тіло людини, та часу їх дії з нормованими параметрами або на методах аналізу статистичних даних електротравм без урахування ймовірнісної природи електротравматизму та можливості виникнення професійно обумовленого захворювання персоналу від дії електричної енергії.

Публікацій щодо оцінювання та аналізу ризику електротравматизму та професійного захворювання [4–7], відрізняються суперечністю факторів дії електрики, точністю методів оцінювання ризику, спірністю трактувань, визначень, не містять системних рекомендацій щодо рішення проблеми підвищення рівня електробезпеки для електротехнічного персоналу, що обслуговує електричні станції та системи надвисоких класів напруги.

Тому аналіз сучасних підходів та методів щодо оцінювання професійного ризику електротравматизму та професійного захворювання електротехнічного персоналу, що обслуговує електроустановки НВН, для його подальшої мінімізації, є актуальним, а реалізація цих методів є якісно новим етапом вдосконалення системи менеджменту електробезпеки в Україні.

Мета дослідження є аналіз сучасних підходів та методів щодо оцінювання професійного ризику електротравматизму та професійного захворювання електротехнічного персоналу, що обслуговує електроустановки НВН для його подальшої мінімізації.

Результати дослідження. У ході дослідження встановлено, що на сьогоднішній день існують чотири різних підходи до оцінювання ризику.

Перший – інженерний. Він опирається на статистику поломок і аварій, на ймовірнісний аналіз безпеки: побудова й розрахунок так званих дерев подій і дерев відмов – процес оснований на орієнтованих графах. За допомогою першого методу передбачають можливі наслідки від відмови техніки, а за допомогою другого методу («дерева подій»), навпаки, допомагають простежити причини, які здатні викликати якісь небажані явища. Коли дерева побудовані, розраховується ймовірність реалізації кожного зі сценаріїв, а потім – загальна ймовірність аварії на об'єкті.

Другий підхід – модельний – побудова моделей впливу шкідливих факторів на людину й навколишнє середовище. У багатьох видах життєдіяльності ризик взагалі можна порівняти не з можливими збитками, а з показниками, що визначають певний вид діяльності, наприклад, з величиною електричного струму, напруги, кількістю отриманого радіаційного опромінення, з характеристиками механічних коливань, масою хімічно небезпечних речовин, що потрапили в організм. Для цього випадку актуальним є принцип: чим ризикуємо, те і є оцінкою ризику (використовуються числові методи «доза – ефект»).

Перші два підходи основані на розрахунках, однак для таких розрахунків не завжди вистачає надійних вихідних даних. У цьому випадку прийнятний третій підхід – експертний: імовірності різних подій, зв'язки між ними й наслідки аварій визначають не обчисленнями, а опитуванням досвідчених експертів. До робіт з експертного оцінювання залучають досвідчених спеціалістів з техніки безпеки, ергономіки, електробезпеки та виробничої санітарії, які випробовують технологічний процес, а також спеціалізовані науково-дослідні та проектні інститути.

Нарешті, у рамках четвертого підходу – соціологічного – досліджується відношення населення до різних видів ризику, наприклад, за допомогою соціологічних опитувань.

На основі аналізу сучасних підходів та методів щодо оцінювання професійного ризику електротравматизму авторами запропонована класифікація методів кількісного оцінювання системи електробезпеки, які можуть бути використані для розв'язання задач мінімізації ризику електротравматизму персоналу електричних станцій та систем. Дана класифікація подана на рис. 1 [8].



Рисунок 1 – Класифікація методів кількісного оцінювання ризику електротравм

Методи можуть застосовуватися окремо або доповнювати один одного, причому якісні методи можуть включати кількісні критерії ризику (в основному, за експертними оцінками з використанням, наприклад, матриці «ймовірність – вага наслідків» шляхом ранжування небезпеки). Повний кількісний аналіз ризику може включати всі зазначені методи.

На основі проведеної класифікації методів кількісного оцінювання ризику електробезпеки, гігієнічних норм умов праці та комбінованого методологічного підходу, який на відміну від відомих узгоджує системний, ризик-орієнтовний та енергетичний підходи з методами оцінювання ризику травмування авторами запропоновано матрицю оцінювання ризиків (MOP) електротравматизму на робочих місцях персоналу електричних станцій та систем (табл. 1).

Таблиця 1 – Матриця оцінювання ризиків на робочих місцях при визначенні професійного ризику електротравматизму персоналу електричних станцій та систем за [9]

| | | | | | | |
|---------------------------|----------|------------|------------|------------|------------|----------|
| 0,7 – 1 (6) | C6 | C12 | B18 | B24 | B30 | B36 |
| 0,3 – 0,7 (5) | H5 | C10 | C15 | B20 | B25 | B30 |
| 0,05 – 0,3 (4) | H4 | C8 | C12 | C16 | B20 | B24 |
| 10^{-3} – 0,05 (3) | H3 | H6 | C9 | C12 | C15 | B18 |
| 10^{-6} – 10^{-3} (2) | H2 | H4 | H6 | C8 | C10 | C12 |
| 0 – 10^{-6} (1) | H1 | H2 | H3 | H4 | H5 | C6 |
| Частота в рік | 2 (1) | 3.1 (2) | 3.2 (3) | 3.3 (4) | 3.4 (5) | 4 (6) |
| | Наслідки | | | | | |

Запропонована МОР професійного захворювання персоналу електричних станцій та систем побудована на основі встановлених елементів ризику: шести рівнів ймовірності небезпечної події (частоти професійного або професійно обумовленого захворювання) та шести рівнів важкості наслідків дії ЕП ПЧ за гігієнічною класифікацією, матриця (6×6). У такій матриці виділено 36 різновидів ризику у вигляді значень ризику для бінарних груп «ймовірність нещасного випадку – важкість травматичної події від дії електричної енергії». Така інформація дала підставу для об'єктивного судження про міру загрози, що забезпечило більшої адресності профілактичних заходів з електробезпеки в електроустановках НВН. На основі МОР, обґрунтована необхідність прийняття рішення підвищення рівня електробезпеки при виконанні робіт на струмовідних частинах повітряних ліній 330–750 кВ.

Для обчислити значення ймовірності щодо загрози безпеки здоров'ю людини від дії електричної енергії, відповідно [10], авторами пропонується використовувати вираз пробіт-функції ризику електротравматизму R :

$$R = 2,5 + 0,7 \cdot \ln(W_{h.} / W_{h.don.}),$$

де $W_{h.}$ – дія електричної енергії з електроустановок на персонал, $W_{h.don.}$ – значення допустимої енергії для персоналу, який знаходиться в зоні дії ЕП ПЧ у Вт•год.

Запропоновані результати розрахунків ймовірності загрози здоров'ю працівника від дії ЕП ПЧ, тобто ступінь перевищення допустимого рівня електричної енергії (разів), наведені у таблиці 2.

Таблиця 2 – Приклад оцінювання ймовірності реалізації загрози від дії електричної енергії з урахуванням гігієнічної класифікації праці та за запропонованим виразом пробіт-функції

| Фактор виробничого середовища | Клас умов праці | | | | | Небезпечний 4 |
|-------------------------------|---|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | Допустимий 2 | Шкідливий 3 | | | 4 ступінь 3.4 | |
| | | 1 ступінь 3.1 | 2 ступінь 3.2 | 3 ступінь 3.3 | | |
| | Клас умов праці за методикою, що пропонується | | | | | |
| Електрична енергія ПЧ (50 Гц) | ≤ ГДР | 1–3 | 3–5 | 5–10 | 10–40 | >40 |
| | Ймовірність реалізації загрози | 0,0001-0,04 | 0,04-0,083 | 0,083-0,2 | 0,2-0,53 | 0,53-1 |

З табл. 2 видно, що величина ризику, яка визначається за пробіт-функцією, змінюється від 0 до 1. Зіставлення рівнів наслідків та ймовірностей з відомими з практики наслідками дозволяє запропонувати ймовірнісний опис класів (категорій) за професійно обумовленого ризику для здоров'я персоналу від дії електричної енергії: перший клас (умови праці оптимальні) – ризик відсутній; другий клас (умови праці допустимі) – припустимий ризик; третій клас (шкідливі умови праці) – ступені: 3.1 – дуже малий ризик; 3.2 – малий ризик; 3.3 – середній ризик; 3.4 – високий ризик; четвертий клас (умови праці небезпечні) – занадто високий ризик.

За значенням ризику професійного захворювання від дії електричної енергії ПЧ за табл.2 можна передбачати черговість та час проведення заходів щодо його зниження. З урахуванням теоретичних досліджень запропоновано при занадто великих, високих та середніх значеннях ризику електротравматизму та професійно обумовленого захворювання від дії ЕП ПЧ (0,083 – 1) проводити моніторинг стану електробезпеки.

Висновки

Врахування запропонованої класифікації підходів та методів оцінювання ризику електротравм проводити теоретичні дослідження причинно-наслідкових зв'язків щодо ризику електротравмування та професійного захворювання для персоналу, який обслуговує електроустановки НВН від дії електричної енергії та підвищити ефективність впровадження міжнародних стандартів OHSAS 18001:2007, ISO 50001:2011 в Україні.

Список використаної літератури

1. Rubanenko O. E. Determination of optimal transformation ratios of EES transformers in conditions of incomplete information regarding the values of diagnostic parameters / O. E. Rubanenko, O. I. Kazmiruk, V. M. Bandura, V. A. Matvijchuk, O. O. Rubanenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technology. – 2017. – №4. – P. 1 - 8. ISSN 1729-3774. doi: 10.15587/1729-4061.

2. Исследование электрического поля линий и подстанций сверхвысокого напряжения переменного и постоянного тока. Сборник научных трудов. / [Л. С. Перельман, Н. Н. Тиходеев, Ю. А. Морозов и др.] – Л.: Энергоатомиздат, НИИПТ, 1985. – 104 с.
3. Основи охорони праці : підруч. / Ткачук К. Н., Халімовський М. О. Зацарний В. В. [та ін.] ; за ред. К. Ткачука і М. Халімовського. – К. : Основа, 2006 – 448 с.
4. Никольский О. К. Новый взгляд на техногенную безопасность в контексте теории оптимизации и риска / Никольский О. К., Ерёмина Т. В., Семичевский П. И. // Вестник Алтайского государственного технического университета им. И. И. Ползунова. – 2009. – № 4. С. 20-25.
5. Кальки Валдис. Основные направления оценки рисков рабочей среды / Валдис Кальки, Имант Кристиньш, Жения Роя. – Рига : SIA «Jelgavas tipografija», 2005. – 73 с.
6. Рижков В. Г. Застосування ризик-орієнтовного підходу для аналізу електротравматизму на металургійних підприємствах. / В. Г. Рижков, О. В. Новоцонова // Металургія: зб. наук. праць ЗДІА: Вип. 23 – Запоріжжя. 2011. – С. 180-186.
7. Хенли Э. Д. Надежность технических систем и оценка риска / Э. Д. Хенли, Х. Кумamoto. Пер. с англ. – М. : Машиностроение, 1984. – 528 с.
8. Бондаренко Є. А. Методи аналізу та оцінювання ризику електротравматизму / Бондаренко Є. А. // Вісник Вінницького політехнічного інституту – 2013. – № 2. – С. 52-56.
9. Бондаренко Є. А. Менеджмент системи електробезпеки щодо мінімізації ризику дії електромагнітного поля на людину в електроустановках надвисокої напруги / Бондаренко Є. А. // НТУУ «КПІ». "ЕНЕРГЕТИКА: економіка, технології, екологія". – 2014. – № 2. – С. 14-21.
10. Bondarenko Y. A. Evaluation of the risk of occupation a diseases caused by electromagnetic field generated by extra-high voltage electric installations // Yevgeni A. Bondarenko, Vasyl M. Kutin, Maryna V. Kutina, Assel Mussabekova, Konrad Gromaszek // SMAILOVA3PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY, R. 93 NR 5 – 2017.– P. 118-121.

E. Bondarenko, Dr. Eng. Sc., Prof.

T. Andrienko, student

D. Kushnir, student

State Institution of Higher Education «Vinnitsa National Technical University»

EVALUATION OF PROFESSIONAL RISKS OF ELECTROTRAVMATISM FOR PERSONNEL OF ELECTRICAL STATIONS AND SYSTEMS

The most common approaches and methods of risk assessment are considered. A classification of methods for the quantitative assessment of the risk of electric trauma has been developed. This allowed to conduct theoretical studies of the cause-effect relationships of the risk assessment of electric trauma and occupational diseases for the personnel of the servicing electrical installation of ultrahigh voltage classes of electric stations and systems from the action of electric energy and to propose a method for its evaluation. A matrix method of risk assessment is proposed, which, unlike the known ones, allocates 36 varieties of risk in the form of values (6×6) for binary groups 'probability of an accident is the severity of a traumatic event from the action of electrical energy'. Qualitative and quantitative indicators of the risk assessment matrix make it possible to draw objective conclusions regarding the dependence of the hazard of the electric field effect on the industrial frequency on the personnel and to transform the obtained estimates into adequate and targeted preventive measures for technological work in electrical installations 330, 500, 750 kV.

Key words: power station, energy, electric field, management, risk, electrical safety.

References

1. Rubanenko O. E. Determination of optimal transformation ratios of EES transformers in conditions of incomplete information regarding the values of diagnostic parameters / O. E. Rubanenko, O. I. Kazmiruk, V. M. Bandura, V. A. Matvijchuk, O. O. Rubanenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technology. – 2017. – №4. – P. 1 - 8. ISSN 1729-3774. doi: 10.15587/1729-4061.
2. Perelman L. S., Tixodeev N. N. and others Investigation of the electric field of the lines and substations of ultrahigh voltage. Collection of scientific papers. – L: Energoatomizdat, NIIPТ, 1985. – 104 p.

3. Tkachuk, K.N. Khalimovski, M.O. and Zatsarny, V.V. Bases of labor protection. Kyiv: Osnova, 2006. 448 p.
4. Nikolsky, O. K, Eryomina, T. V and Semichevsky P.I. “New view on technogenic safety in a context of the theory of optimization and risk”, *Visnyk Altayskoho technichnoho universiteta*, 2009; vol. 4, pp. 20-25.
5. Kalki Valdis, Imant Kristinsh, Zheniva Roya. Osnovnye napravleniya ocenki riskov rabochej sredy. Riga: SIA «Jelgavas tipografija», 2005. 73 p.
6. Rizhkov, V.G. and Novoshchonova, O.V. (2011), “Application hazard for the analysis electro traumas at the metallurgical enterprises”, *Metallurgy: Naukovi pratsi ZDIA, Zaporozhye*, vol. 23, pp. 180-186.
7. Henli, E.D. and Kumamoto K. Reliability of the technical systems and risk assessment, Moscow: Machinostroenie, 1984; 528 p.
8. Bondarenko E. A. “Metody analizu ta otsiniuvannia ryzyku elektrotravmatyzmu”, *Visnyk Vinnitskoho politechnichnoho institutu*, 2013; vol. 2, pp. 52-56.
9. Bondarenko E. A. “Management of electro security systems for minimization of risk from influence of the electromagnetic field on the person in electro installations of ultrahigh voltage”, Kiev, ENERGETYKA: ekonomika, technolohiyi, ekologiya, 2014; vol. 2 (36), pp. 14-21.
10. Bondarenko Y. A. Evaluation of the risk of occupation a diseases caused by electromagnetic field generated by extra-high voltage electric installations // Yevgeni A. Bondarenko, Vasyl M. Kutin, Maryna V. Kutina, Assel Mussabekova, Konrad Gromaszek // SMAILOVA3PRZEGLAD ELEKTROTECHNICZNY, R. 93 NR 5 – 2017.– P. 118-121.

УДК 621.3:614.8

Е.А. Бондаренко д-р техн. наук, доц.
Т.В. Андриенко студ.,
Д.С. Кушнир студ.

Винницкий национальный технический университет

ОЦЕНКА ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ РИСКОВ ЭЛЕКТРОТРАВМАТИЗМА ДЛЯ ПЕРСОНАЛА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ И СИСТЕМ

Рассмотрены наиболее распространенные подходы и методы оценки риска. Разработана классификация методов количественной оценки риска электротравм. Это позволило проводить теоретические исследования причинно-следственных связей оценки риска электротравм и профессиональных заболеваний для персонала обслуживающего электроустановки сверхвысоких классов напряжения электрических станций и систем от действия электрической энергии и предложить метод для его оценки. Предложен матричный метод оценки риска, который, в отличие от известных, выделяет 36 разновидностей риска в виде значений для бинарных групп «вероятность несчастного случая - тяжесть травматического события от действия электрической энергии». Качественные и количественные показатели матрицы оценки риска позволяют делать объективные выводы относительно зависимости опасности влияния электрического поля промышленной частоты на персонал и трансформировать полученные оценки в адекватные и адресные профилактические мероприятия для технологических работ в электроустановках 330, 500, 750 кВ.

Ключевые слова: электростанция, энергия, электрическое поле, менеджмент, риск, электробезопасность.

Надійшла 17.04.2018

Received 17.04.2018

THE MEASURES FOR SUPPRESSION APERIODIC CURRENT COMPONENT IN EXTRA-HIGH VOLTAGE LINES 750 kV

At present, the networks of extra-voltage received the SF₆ switches with the auto-compression principle of extinguishing the arc. The experience of operation showed the inability of these switches to perform commutation-type quick "on/off" for lines with a high degree of compensation of charging power due to the existence of a long durable aperiodic component in the current flowing in the switch. The results of investigation of the causes of accidents of SF₆ circuit breakers during commutation of compensated transmission lines of 750 kV are presented. In the article have been reported, that the presence of a large aperiodical component of current prevent the current from crossing zero for several milliseconds, resulting in serious damage to one pole of circuit breaker.

In the work the analysis of abnormal modes of extra high voltage transmission lines with different measures is performed. The article deals with the cycle of three-phase automatic re-inclusion on the 750 kV line with two groups of shunt reactors installed. Electromagnetic processes in compensated transmission lines depending on parameters of the line are investigated. The moments of a sharp change in parameters of transient processes during switching in extra-high voltage lines are revealed. Measures to limit the duration of the existence of the aperiodic component of the current are considered.

In the main power Ukrainian grids have replaced air switches for SF₆ gas switches. This upgrade was caused by the fact that modern electrical industry does not produce air switches and in the event of damage to repair and restore power would be impossible. Compared to SF₆ gas air circuit breakers have certain advantages, the main ones are speed and high breaking capacity, and the possibility of an extra device controlled switching. This upgrade was carried out from 2010 year to 2014.

Nevertheless new SF₆ breakers have a lot advantages, but some nuances were discovered in the process of using 750 kV on long overhead power lines with shunt reactors installed on them, due to which there were several accidents at the substations. Damage 750 kV circuit breakers, which in recent years have occurred on several foreign substations and also in Ukraine, served as an excuse for starting the necessary development of normative documents, establishing regulations and norms of operation.

Keywords: short circuit, three-phase automatic reclose, aperiodical current component, pre-insertion resistor, damping constant, total current of electromagnetic transient.

General characteristics of the problem.

In main power electrical networks of Ukraine, the replacement air circuit breakers on sulfur hexafluoride (SF₆) circuit breakers were implemented. This modernization is due to the fact that the modern electrotechnical industry does not manufacture air switches and, in case of accident, repairs these breakers and renews electrical supply will be impossible. In comparison with air circuit breaker, the SF₆ has certain advantages, the main ones being the speed and high switching power, as well as the possibility of installing an additional control switching device and pre-insertion resistors. The switching point of an SF₆ circuit breaker is a probabilistic parameter and it is impossible to perform switches at the required moment without the use of controlled switching. Such a disadvantage during the operation led to emergency situations, including the appearance of aperiodic (AP) current component at electromagnetic transients [1-5].

So the presence of a significant aperiodic component in the current through the switch leads to the fact that the current passing through zero can happen only after a certain time (up to several tenths of seconds) after switching on. For asymmetric faults in damaged phases, the damping rate of the aperiodic component is rather high, and the amplitudes of the aperiodic component and the periodic current of the steady-state regime are approximately equal. Therefore, in the damaged phases the problem of a long non-transient current through zero is absent. In undamaged phases, the amplitude of the aperiodic component is several times greater than the amplitude of the periodic current of the steady-state regime. Therefore, when reclosing of the line (planned or in the three phase auto-reclose cycle (TPAR)) in the case of an asymmetrical short circuit on this line, it can be difficult to disconnect its undamaged phases.

Therefore, in design practice to ensure reliable operation of overhead lines equipped with SF₆ circuit breakers with an intensive arc suppression system, it is necessary to perform calculations related to the analysis of the switching capacity of such at commutations.

The aim of article is to study the conditions for the appearance of unacceptable values and the duration of the AP current component of the transition process to avoid damage of the poles SF₆ circuit breakers. This goal implies developing measures to prevent possible emergency situations in extra-high voltage lines 750 kV.

Proposed approach to problem solving.

As design commutations on overhead lines, at which dangerous values of the aperiodic component of the current in the circuit breaker can occur, it is necessary to consider:

- a) re-closing of the unsuccessful TPAR in the cycle with a short-circuit in the pause, which occurred again or taking into account the possible false operation of the relay protection;
- b) re-closing in the cycle of an unsuccessful TPAR with non-stopping short-circuit on the power line;
- c) re-closing in the cycle of a successful single phase auto-reclose (SPAR) with a short-circuit fault on the line, taking into account possible false protection relay operation.

A single-line scheme of extra-high voltage line is shown on (Fig.1). The structure of the circuit consists of the following elements: L_M – the inductance of the groups of the shunt reactors for the compensation of the mutual capacitance C_M , L_E - the inductance of the groups shunt reactors which compensate for the capacitance on the ground C_E , L_L - inductance phase of the line, L_{S1}, L_{S2} - inductance of the power systems, L_M - phase-to-phase inductance of the air line, R_M - active resistance of component shunt reactor, that compensate C_E , R_E - active resistance of component shunt reactor, that compensate C_M , R_{Eqv} - equivalent active resistance of systems and overhead line.

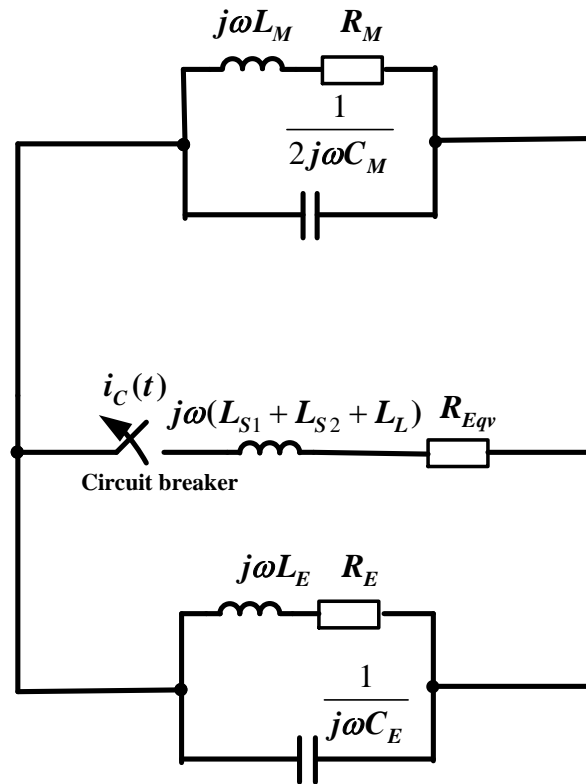


Figure 1 – The single-line scheme of extra-high voltage line

On (Fig.2) are shown the total current of electromagnetic transient at reclosing TPAR undamaged phase. We can see that the value of the AC of the current determines the moment of the transition of current through zero. Accordingly, the larger this component of the current of the transient process, the longer the arc will burn in the arc-camera, which will damage the switch's pole. Prolonged burning of the arc in the interconnecting gap of an SF₆ switch leads to burning of contacts, overheating of the arc gas and extreme pressure increase in the chamber. In this case there is an explosive breakdown of the switch's pole.

The total current value in the switch $i_C(t)$ is determined by the expression:

$$i_C(t) = i_{inv}(t) + i_{ap}(t) + i_{osc}(t)$$

where

$i_{inv}(t) = I_{inv} \cos(\omega t + \Psi)$ involuntary component voltage in circuit breaker; ω - angular velocity; I_{inv} and Ψ - amplitude and phase of involuntary value of current.

$i_{ap}(t) = I_{ap}e^{-t/\tau}$ aperiodical component in circuit breaker; I_{ap} - amplitude of aperiodical component; t - time of electromagnetic transient; τ - the damping constant of the AC.

$i_{osc}(t) = I_{tr}e^{-t/\tau_{osc}} \cos(\omega t + \Psi_{tr})$ decaying current transient component in circuit breaker. I_{tr} and Ψ_{tr} - amplitude and phase of decaying transient component; τ_{osc} - the damping constant of decaying current transient component.

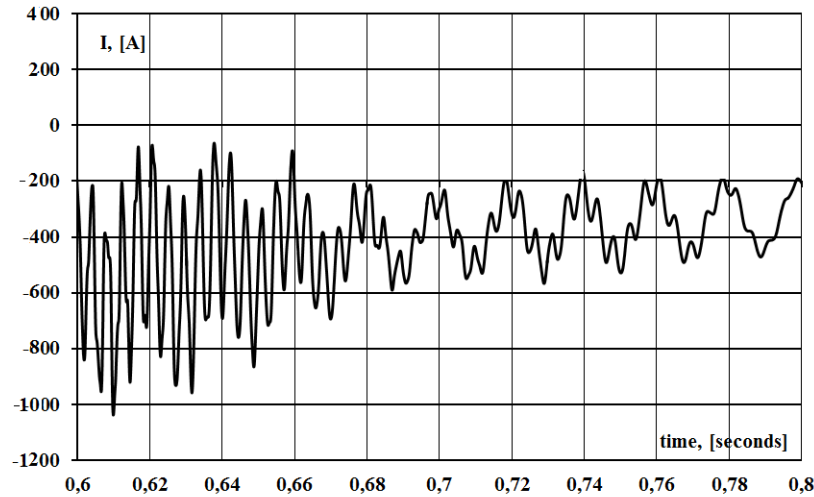


Figure 2 – The total current of electromagnetic transient

The time constant of the damping of the aperiodic component of the current can be determined from the ratio of the active resistance and the inductive current in the flow circuit. The damping constant of the AC of the current in the switch when the line is switched on with shunt reactors, is determined by the expression:

$$\tau = \frac{L_M + L_E + L_{S1} + L_{S2} + L_L}{R_{Eqv} + R_M + R_E} \quad (1)$$

In this work, the modes of operation of switch are considered in the fast "on/off" cycle of the pause a TPAR cases a-c) of extra high voltage line 750 kV, when at the moment of connection in the current of the switch there is mainly AP component whose value is more than several hundred amperes. Also it should be noticed, that active resistance of the line and equivalent active resistance of systems are neglected due to small value relative to inductance resistance of shunt reactors and other power equipment.

So, the initial value of the AP current component depends of values (1). On (Fig.3) are shown AP in phase A in cycle of TPAR. The permissible value of AP component for SF₆ circuit breakers 750 kV is 58% of total current at the transition process.

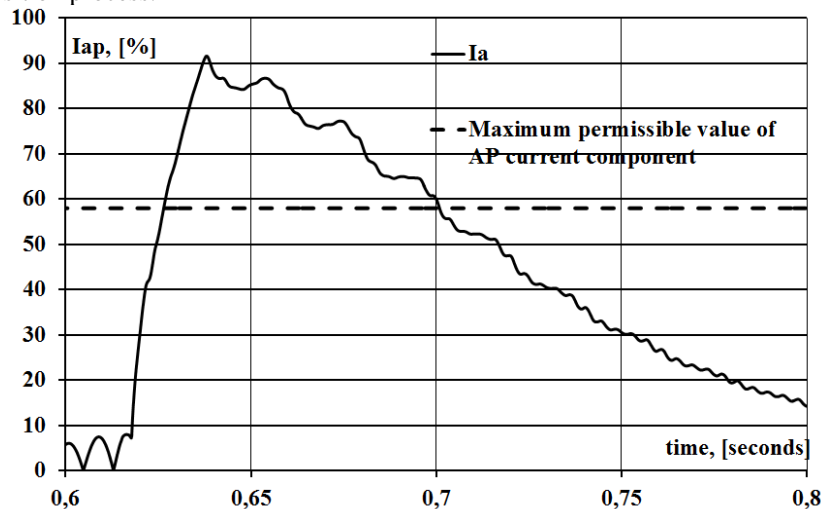


Figure 3 – Excess the current AP component the maximum permissible value

One way for suppression AP is growing active resistance. So, one of the solutions to mitigate the risk related to the magnitude and duration of AP component is pre-insertion resistors (PIR). There are basically two different PIR configurations: parallel and series. In parallel PIR configuration, the resistor switch is in series with the resistor bank, and both are in parallel with the circuit breaker interrupter, where the interrupter operation follows the PIR switch operation. In a series PIR configuration, the resistor switch is in series with the circuit breaker interrupter but in parallel with an overhead line.

The second traditional measure to reduce the magnitude and duration of AP component is energizing overhead line by controlling the closing moments of the circuit breaker poles [3]. The controlled commutation is used to eliminate undesirable effects of transients during scheduled switching of capacitor banks, shunt reactors, overhead lines and power transformers. The purpose of this device is to close and/or unlock the terminals of the switch at the required point of the sinewave of the current or voltage. It should be noted that ABB (Asea Brown Boveri Ltd.) has developed switching device SwitchSync F236 [3-5], which is intended for SF₆ switches with polar control. The moments of disconnection for phases control switch device are shown on figure 4.

All circuit breakers are equipped controlled switching device SwitchSync F236. The main advantages of the SwitchSync F236 in comparison with other devices are shown in Table 2. Among them there are application area and breaker operation. The SwitchSync F236 can be used for commutation of all power equipment unlike others.

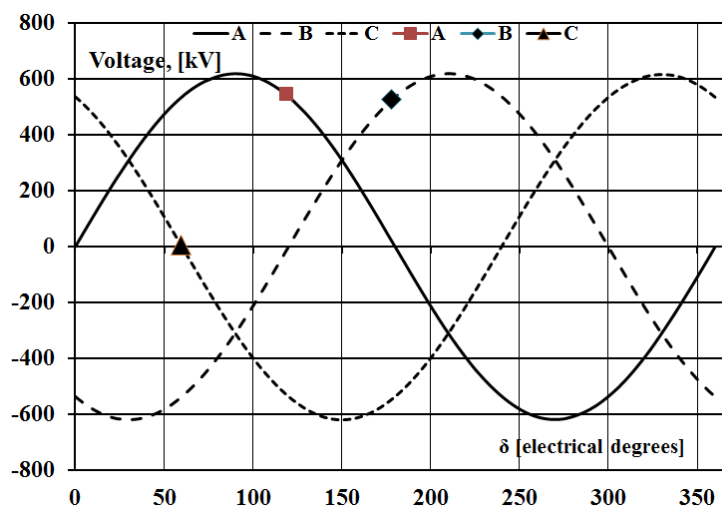


Figure 4 – Sine wave voltage phases A, B, C with designated switching points

The application of PIR can reduce (1) and, consequently reduce amplitude and duration AP in circuit breaker. When using the PIR for a certain period of time before closing the main contacts of the circuit breaker, auxiliary contacts are switched on, in series with the active contacts resistance (Fig. 5 a)) for series and (Fig. 5 b)) for parallel connection. Due to this, at the first moment of time after the contacts are closed, an intensive damping of the electromagnetic transient is carried out. Used in modern switches, the pre-activation time of the resistors varies within 8-12 ms. In the present work, the pre-connection time is assumed equal to 10 ms.

On (Fig. 5 a and b) is shown the connection diagram of the PIR to the switch. Main contacts 1, 2 of circuit breaker can be locked with springs after their unlocking. In all circuits, the main contacts 1 and 2 are disconnected before the auxiliary 3 and 4, and switched on later (unless, of course, contacts 1 and 2 remained disconnected).

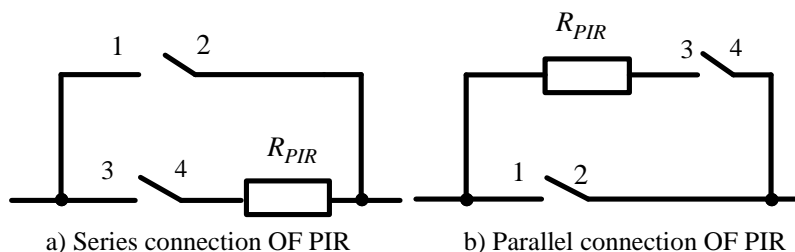


Figure 5 – Connection of pre-insertion resistor

When installing switches with PIR on the overhead line, the AP in the current arises both at the first stage of switching on- when arcing contacts are switched on, and in the second stage of switching on-when the main contacts shunt resistors. At the first stage of reclose AC due to PIR, included in the circuit, that fades faster than in the circuit without a resistor. At the second stage of the re-closing, an AC appears again, the initial value of which is much smaller than in the first stage (the amplitude of the aperiodic component in the second stage of the

inclusion may be zero, and maybe about 30% less than at the first switching stage, depending on the moment including the main contacts).

Therefore, not for all values of the resistance and not in all circuit-mode situations, the current transition through the zero value is guaranteed by the time when the breaker contacts begin to break. Solving the issue of reliability of arc extinction in the switch when installing on lines switches with PIR should be taken after the carefully exact selection of the value of the resistance and the time it is in the circuit and check the efficiency of the selected resistor for all possible commutations

It should be noted that nowadays don't exist studies in which compare the effectiveness of the PIR using of different designs in combination with a controlled switching device for suppressing the AP current component. The (Fig. 6) shows the results of comparing the efficiency of the application of two designs of PIR in combination with a control switching device. As can be seen from (Fig. 6), when using a PIR connected in 6series to the circuit breaker, it will be possible to suppress the AP component and, consequently, such a measure can be recommended for installation on extra-high voltage lines.

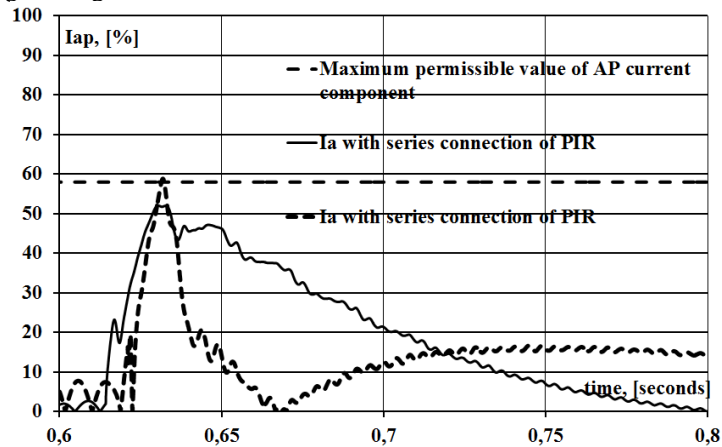


Figure 6 – Comparison the effectiveness of the PIR using of different designs in combination with a controlled switching device

The total current value in the switch $i_C(t)$ at using combined measure is shown on Fig. 7. As can be seen from the figure, the aperiodic component in the current of the intact phase is absent.

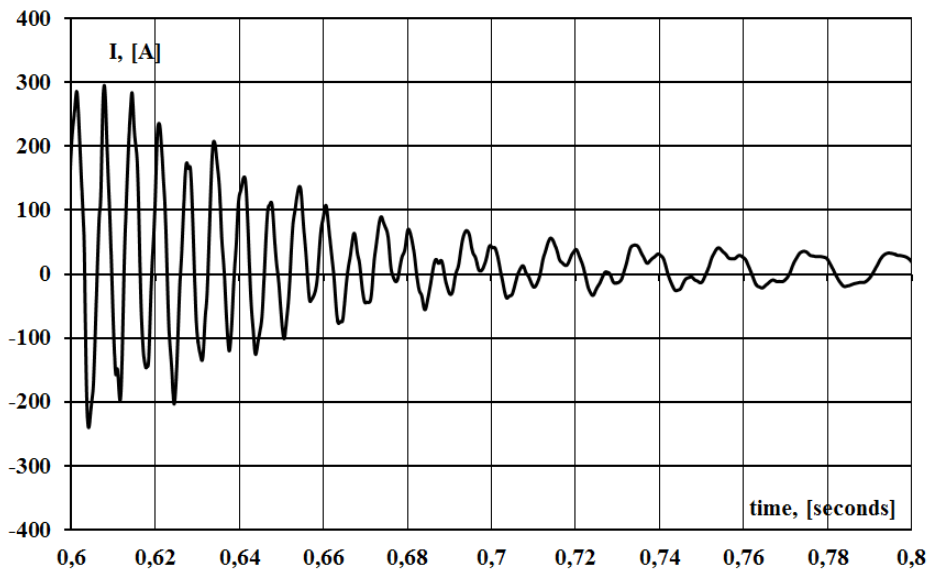


Figure 7 – The total current of electromagnetic transient at using PIR connected in series with with designated switching points

Conclusions.

Thus, although the replacement of the traditional air circuit breakers on SF₆ as rule, leads to an increase reliability of electrical supply, nevertheless, it can be concluded that it is necessary to perform before the modernization the preliminary analysis of transient processes arising from switching, in particular the value of the

current aperiodic component. The measure for preventing failures caused by the inability of the SF₆ circuit breaker poles to interrupt current that does not cross zero for a long period of time due to the presence of large aperiodic component is suggested.

Present work contains an analysis of the conditions for the onset of an aperiodic component of the current in circuit switching by SF₆ circuit-breakers with installed shunt reactors. When the charging power of the line is close to unity, during fast on / off cycles, the aperiodic component value cannot change instantaneously, which, together with the structural features of the gas-insulated circuit breakers, leads to emergencies.

The inclusion of a transmission line 750 kV in the absence of a zero crossing is a dangerous phenomenon that can occur when operating modern circuit breaker. The use of the PIR, together with the corresponding settings of the controlled switching device in the circuit breaker, is an effective measure for prevention the presence of the AC in the current. In addition, the use of the PIR should not introduce any undesirable consequences for the system. Since the value of the resistor depends on the moment of switching the switch it is impossible to determine for all possible cases of exploitation of transmission lines. But regardless of the moment of turning on, the use of such a resistor significantly reduces the aperiodic component of the current that occurs when the line is turned on.

References

1. Controlled Switching // Buyers & Application Guide, Edition 3.1. ABB. – 2010. – P. 54.
2. Kachesov V.E., Kachesov D.V. Requirements for switching algorithms of EHV shunt compensated OHL by SF₆ circuit breakers. // Proceedings of International Conference on power systems Transients (IPST 2011). – Delft, Netherlands, 14-17 June, 2011. – 2011. – Pp. 15-18.
3. Y. Tugay. The resonance overvoltages in EHV network. Proceedings of IEEE Sponsored Conference EPQU'09 – International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation, Poland, Lodz, September 15-17, 2009 – Pp. 14–18.
4. Naumkin I., Balabin M., Lavrushenko N., Naumkin R. Simulation of the 500 kV SF₆ circuit breaker cutoff process during the unsuccessful three-phase autoreclosing // Proceedings of International Conference on power systems Transients (IPST 2011). – Delft, Netherlands, 14-17 June, 2011. – 2011. – Pp. 5-11.
5. Tugay Y.I., Mel'nychuk V.A. Transients in power distribution devices with SF₆ breakers // Pratsi Instytutu
6. elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy – 2014. – №39. – P. 5–9.

УДК 621.315.1

В.В. Кучанський, канд. фіз. мат. наук, ORCID 0000-0002-8648-7942
Інститут електродинаміки НАН України

ЗАХОДИ ОБМЕЖЕННЯ АПЕРІОДИЧНОЇ СКЛАДОВОЇ СТРУМУ ПРИ КОМУТАЦІЯХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ НАДВИСОКОЇ НАПРУГИ 750 КВ

В даний час в мережах надвисокої напруги отримали розповсюдження елегазові вимикачі з автокомпресійним принципом гасіння дуги. Досвід експлуатації показав нездатність даних вимикачів виконувати комутацію по типу «включення-швидко відключення» для ліній з реакторами при високому ступені компенсації зарядної потужності внаслідок існування тривалої затухаючої аперіодичної складової в струмі, що протікає в вимикачі. Наведено результати дослідження причин аварій лінійних елегазових вимикачів при комутаціях компенсованих ліній електропередачі 750 кВ. Сформульовано рекомендації по запобіганню аварій через тривале невідключення полюсом елегазового вимикача струму, що не переходить через нуль внаслідок наявності в ньому великої аперіодичної складової. В роботі виконано аналіз аномальних режимів ліній електропередачі надвисокої напруги. Досліджені електромагнітні процеси в компенсованих лініях електропередачі в залежності від моментів комутації. Виявлені моменти різкої зміни параметрів перехідних процесів під час комутації в лініях надвисокої напруги. Розглянуто заходи обмеження існування тривалої аперіодичної складової струму.

Ключові слова: коротке замикання, трифазне автоматичне повторне включення, аперіодична складова струму, передвключений активний опір, постійна затухання, повний струм електромагнітного перехідного процесу.

1. Controlled Switching // Buyers & Application Guide, Edition 3.1. ABB. – 2010. – P. 54.
2. Kachesov V.E., Kachesov D.V. Requirements for switching algorithms of EHV shunt compensated OHL by SF6 circuit breakers. // Proceedings of International Conference on power systems Transients (IPST 2011). – Delft, Netherlands, 14-17 June, 2011. – 2011. – Pp. 15-18.
3. Y. Tugay. The resonance overvoltages in EHV network. Proceedings of IEEE Sponsored Conference EPQU'09 – International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation, Poland, Lodz, September 15-17, 2009 – pp. 14–18.
4. Naumkin I., Balabin M., Lavrushenko N., Naumkin R. Simulation of the 500 kV SF6 circuit breaker cutoff process during the unsuccessful three-phase autoreclosing // Proceedings of International Conference on power systems Transients (IPST 2011). – Delft, Netherlands, 14-17 June, 2011. – 2011. – Pp. 5-11.
5. Tugay Y.I., Mel'nychuk V.A. Transients in power distribution devices with SF6 breakers // Pratsi Instytutu elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy – 2014. – №39. – P. 5–9.

УДК 621.315.1

В.В. Кучанский, канд. физ. мат. наук, ORCID 0000-0002-8648-7942
Институт электродинамики НАН Украины

МЕРЫ ОГРАНИЧЕНИЯ АПЕРИОДИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ТОКА ПРИ КОМУТАЦИИ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ СВЕРХВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ 750 кВ

В настоящее время в сетях сверхвысокого напряжения получили распространение элегазовые выключатели с автокомпрессионным принципом гашения дуги. Опыт эксплуатации показал неспособность данных выключателей выполнять коммутацию по типу «включение-быстрое отключение» для линий с реакторами при высокой степени компенсации зарядной мощности вследствие существования длительной затухающей апериодической составляющей в токе, протекающем в выключателе. Приведены результаты исследования причин аварий линейных элегазовых выключателей при коммутации компенсированных линий электропередачи 750 кВ. Сформулированы рекомендации по предотвращению аварий из-за длительного неотключения полюсом элегазового выключателя тока, не переходит через ноль вследствие наличия в нем большой апериодической составляющей. В работе выполнен анализ ненормальных режимов линий электропередачи сверхвысокого напряжения. Исследованы электромагнитные процессы в компенсированных линиях электропередачи в зависимости от моментов коммутации. Выявлены моменты резкого изменения параметров переходных процессов при коммутации в линиях сверхвысокого напряжения. Рассмотрены меры ограничения существования длительной апериодической составляющей тока.

Ключевые слова: короткое замыкание, трехфазное автоматическое повторное включение, апериодическая составляющая тока, предвключенное активное сопротивление, постоянная затухания, полный ток электромагнитного переходного процесса.

Надійшла 17.04.2018
Received 17.04.2018

Б.И. Басок, чл.-кор. НАН Украины, проф., д.т.н., ORCID 0000-0002-8935-4248

А.В. Тимошенко, к.т.н., ORCID 0000-0001-6840-5491

Н.С. Корбут, ORCID 0000-0003-2766-0036

Институт технической теплофизики НАН Украины

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА В СЛОЕ ТВЕРДОГО ДИСПЕРСНОГО МАТЕРИАЛА ИЗ ГОРНЫХ ПОРОД МАГМАТИЧЕСКОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

Сдерживающим фактором к широкому применению безопасной, повышающей стойкость к пожарам, теплоизоляции на основе базальтовых волокон, является ее высокая себестоимость, обусловленная высокими удельными расходами энергии на ее производство. Одним из факторов повышающих энергоэффективность производства является утилизация ВЭР высокотемпературных продуктов сгорания. В качестве насадки высокотемпературного регенеративного теплообменника рассматривается базальтовая крошка. Цель работы состоит в исследовании процесса конвективного теплообмена воздуха в тонком слое базальтовой крошки. Приведены характеристики базальтового сырья, определены его структурные и линейные свойства. Проведена оценка интенсивности конвективного теплообмена в насадке. Приведена характеристика экспериментального стенда. Представлены результаты исследований. Установлено, что коэффициенты конвективной теплоотдачи для засыпок с толщиной слоя 1,5-3,0 характерных линейных размера дисперсной частицы в 4 раза меньше значений, полученных для плотных, протяженных слоев дисперсной системы. Высказаны предположения относительно полученных отличий.

Ключевые слова: теплоизоляция, базальты, конвективный теплообмен.

Введение

Экологически безопасная, долговечная и пожаростойкая тепловая изоляция на основе базальтовых супертонких волокон обладает совокупностью характеристик, представляющих интерес как для специализированных объектов и устройств, так и для объектов промышленного и гражданского строительства [1, 2]. Штапельное БСТВ – это совокупность волокон со средним диаметром 1-3 мкм. Они характеризуются широким температурным диапазоном применения (от -260 до +700°C), обладают высокой термовибростойкостью и низкой гигроскопичностью, удерживают первоначальную форму при длительной эксплуатации, химически инертны и сохраняют теплоизоляционные свойства длительный период [3, 4].

В технологии производства базальтовых волокон для получения расплава горных пород могут использоваться: ваграночный (рудно-термический), ванный, электродуговой или индукционный способы. Каждый из них обладает рядом преимуществ и недостатков. В настоящий момент в промышленности теплоизоляционных материалов наиболее освоенным и широко применяемым является ванный способ, используемый, в том числе, и в дуплекс-технологии. Промышленная дуплекс-технология и оборудование для производства БСТВ были созданы в Украине в 70-х годах XX ст., главное место в этой разработке занимали академические и отраслевые институты.

Суть дуплекс-технологии заключается в двойной обработке материала с получением на первом этапе ансамбля монофракционных грубых волокон, с последующей его раздувкой в штапельные супертонкие волокна на втором этапе технологии. Материал загружается в плавильную печь, где происходит его плавление (стеклообразование), дегазация и гомогенизация; из гомогенного расплава через фильеры вытягиваются грубые волокна, которые повторно расплавляются и раздуваются высокотемпературными продуктами сгорания природного газа в супертонкое штапельное волокно. Основным недостатком дуплекс-технологии является ее высокая энергоемкость. Подробный анализ технологических процессов показывает, что доля энергоресурсов, а это природный газ и электроэнергия, в общей себестоимости продукции составляет более 80%. При этом непосредственно на природный газ приходится 70-75% от этой величины. Объемы потребления природного газа на первом и втором этапах технологии приблизительно одинаковы.

В таблице 1 приводятся удельные энергетические показатели, характерные для типового технологического процесса.

Таблица 1 - Удельные энергетические показатели

| № пп | Наименование позиции | Единица измерения | Величина |
|------|--------------------------------------|-----------------------------|-----------|
| 1 | Удельное потребление природного газа | ст. м ³ /кг БСТВ | 3,8...4,5 |
| 2 | Удельное потребление электроэнергии | кВт·час/кг БСТВ | 2,8...3,5 |

Работы по энергетическому совершенствованию дуплекс-технологии направлены на уменьшение регенеративных и рекуперативных потерь в технологическом оборудовании, устранении неорганизованного газообмена в высокотемпературных элементах ванной плавильной печи, глубокую утилизацию теплоты продуктов сгорания с возвращением части ВЭР в технологический цикл, интенсификацией процессов термообработки расплава базальта в ванной и фидере плавильной печи. Энергетическое совершенствование дуплекс-технологии преследует своей целью кардинальное снижение потребления природного газа на выпуск единицы готовой продукции. Расчетное снижение удельного потребления природного газа составляет более 2 раз.

Вопрос исследования процесса конвективного теплообмена в слое твердого дисперсного материала из основных горных пород касается части мероприятий по комплексному использованию теплоты продуктов сгорания после ванн плавильных печей с целью повышения их энергетической эффективности, продления межремонтного срока их эксплуатации, снижения удельного расхода теплоты на получение расплава. Утилизация теплоты отходящих газов осуществляется двумя способами: подогревом воздуха, поступающего на горение, и предварительным подогревом сырья, поступающего на плавление, гомогенизацию и дегазацию.

Цель работы состоит в исследовании нестационарного процесса конвективного теплообмена воздуха в плотном слое твердого дисперсного материала из горных пород магматического происхождения.

Задачи и методы исследования

Задача исследования состояла в изучении конвективного теплообмена воздушного потока в слое дисперсного материала – базальтовой крошки – при толщине слоя дисперсной системы составляющей 1,5-3,0 характерных линейных размера дисперсной частицы. Решение задачи осуществлялось с использованием экспериментальных и аналитических методов.

Для производства штапельного базальтового волокна в качестве сырья используются изверженные основные горные породы, которые относятся к ископаемым магматического происхождения (базальты, диабазы, амфиболиты). На территории Украины широко распространены основные горные породы, имеющие высокую природную химическую и термическую стойкость. Особенность пород местных месторождений состоит в их установившемся оптимальном минералогическом составе, низкой (относительно другого базальтового сырья) температуре плавления, широком температурном диапазоне границ кристаллизации базальтового стекла и отсутствии необходимости дополнительного шихтования перед варкой стекломассы [5].

Теплофизические свойства базальтовых пород представлены ниже (табл. 2, рис. 1).

Таблица 2 – Теплофизические характеристики базальтов [6]

| Характеристики | Ед. изм. | Условие | Значения |
|------------------------|-------------------|--------------------|---------------------------------|
| Удельная теплоемкость | кДж/(кг*К) | при 273 (К) | 0,85 |
| | | при 1473 (К) | 1,49 |
| Плотность | кг/м ³ | | 2600...3250 |
| Теплопроводность | Вт/(м*К) | средняя | 1,3 |
| | | диапазон | 0,44...3,5 |
| Температуропроводность | м ² /с | средняя | 6,29*10 ⁻⁷ |
| | | диапазон изменений | (3,44...13,45)*10 ⁻⁷ |

Теоретически базальтовые породы и расплавы из них оценивают по модулю кислотности M_k , характеризующего в первом приближении степень легкоплавкости сырья:

$$M_k = \frac{(SiO_2 + Al_2O_3)}{(CaO + MgO)}, \quad (1)$$

Основные горные породы, применяемые в производстве, имеют высокий модуль кислотности ($M_k > 2$), что положительно влияет на химическую и термическую стойкость волокна. В качестве примера в табл. 3 приведен M_k и химический состав базальта месторождения Янова Долина Ровенской обл.

Температура плавления базальтовых породы данного месторождения 1160-1230°С.

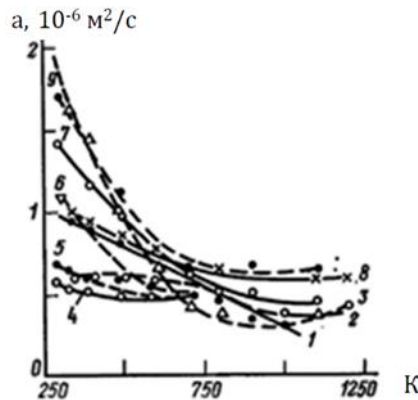


Рисунок 1 – Зависимость температуропроводности горных пород от температуры [6]: 1 – диорит; 2 – гранит; 3 – базальт; 5 – оливинный базальт.

Таблица 3 – Химический состав базальта месторождения Янова Долина Ровенской обл.

| Массовая доля оксида, % | | | | | | | | |
|-------------------------|------------------|--------------------------------|------|--------------------------------|------|------|------------------|----------------------------|
| SiO ₂ | TiO ₂ | Fe ₂ O ₃ | FeO | Al ₂ O ₃ | CaO | MgO | R ₂ O | M _к по ф-ле (1) |
| 50,47 | 2,48 | 8,5 | 9,45 | 12,47 | 9,34 | 5,74 | 4,11 | 4,17 |

Определение линейных и структурных свойств объекта исследования

Засыпки дисперсных материалов характеризуют следующими геометрическими факторами [7]: размеры и форма частиц, поверхность частиц, распределение по гранулометрическому составу, плотность и порозность (пустотность) неподвижного дисперсного слоя. С целью определения необходимых для вычисления процессов переноса геометрических факторов, изучались частицы базальтового щебня размером от 2 до 19 мм. Это полидисперсный материал, форма частиц которого отличается от геометрических фигур правильной формы (рис. 2). Слой дисперсного материала из частиц неправильной формы условно заменяется слоем материала, состоящим из монодисперсных сферических частиц эквивалентных по объему, с диаметром $d_э$.



Рисунок 2 – Выборка базальтовой крошки

Эквивалентный диаметр засыпки дисперсного материала определялся двумя методами. Первый метод – интегральный – состоял в измерении объема V_i каждой i -й частицы из выборки. С использованием зависимости

$$d_{э,i} = \left(\frac{6V_i}{\pi} \right)^{1/3} \quad (2)$$

определяем значение эквивалентного диаметра для каждой i -й частицы выборки. После чего, средний эквивалентный диаметр выборки из N частиц определяется как среднее арифметическое значение

$$d_э = \frac{\sum_{i=1}^N d_{э,i}}{N} \quad (3)$$

Второй метод – статистический – состоял в измерении линейных размеров i -й частицы выборки (a, b, c) по трем взаимно перпендикулярным направлениям Ox, Oy, Oz . Эквивалентный линейный размер i -й частицы определялся как среднее арифметическое значение

$$d_{э,i} = \frac{a_i + b_i + c_i}{3} \quad (4)$$

Средний эквивалентный диаметр выборки из N частиц определялся выражением (3).

Средние эквивалентные диаметры для выборки из $N=86$ определенных интегральным и статистическим методами составили 8,9 мм и 8,8 мм, соответственно. Кривые распределения линейных размеров дисперсных частиц (a_i, b_i, c_i) и их эквивалентных диаметров $d_{э,i}$ представлены ниже (рис. 3, рис. 4).

Важнейшей характеристикой состояния дисперсных систем является порозность (пустотность) неподвижного слоя щебня (ε) [7]. Она зависит от формы, гранулометрического состава, размера и способа упаковки частиц. Пустотность щебня определяем расчетным путем, на основании предварительно установленных значений средней плотности зерен и насыпной плотности щебня по ГОСТу 8269.0-97* [8, разд. 4.16, 4.17]:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_{\text{нас}}}{\rho_{\text{м}}} = 1 - \frac{1611}{2938} = 0,45, \quad (5)$$

где $\rho_{\text{нас}} = 1611 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, $\rho_{\text{м}} = 2938 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

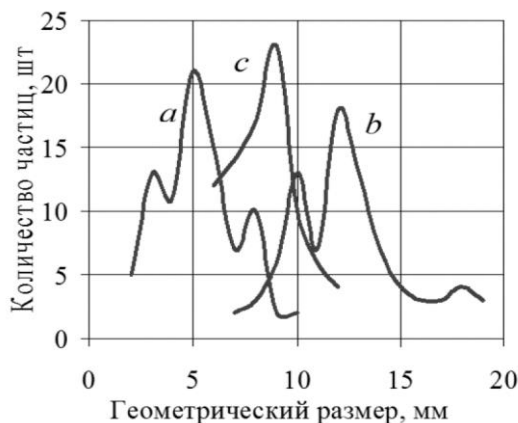


Рисунок 3 – Кривая распределения линейных размеров дисперсных частиц (a_i , b_i , c_i)

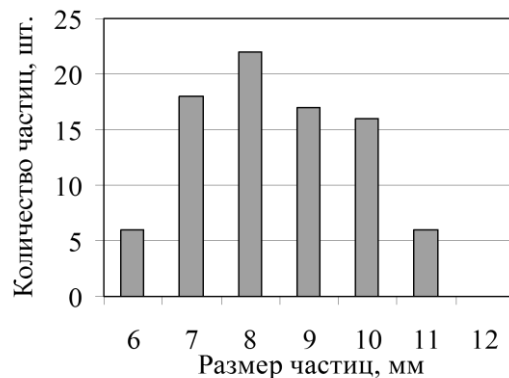


Рисунок 4 – Кривая распределение эквивалентных диаметров дисперсных частиц ($d_{3,i}$)

В дальнейших расчетах в качестве характерного линейного размера процесса принимается значение эквивалентного диаметра $d_3 = 8,8 \cdot 10^{-3}$ м.

Удельная расчетная поверхность контакта дисперсной системы составляет $374 \text{ м}^2/\text{м}^3$.

Интенсивность конвективного теплообмена в слое твердого дисперсного материала

Оценим величины безразмерного коэффициента теплоотдачи в слое дисперсного материала. Для определения коэффициентов теплоотдачи при движении теплоносителя в плотном неподвижном слое или в малоподвижном продуваемом слое, рекомендуются следующие критериальные уравнения Тимофеева, использующиеся для частиц различных размеров при любых значениях порозности слоя [9]:

при $20 < Re < 200$ $Nu = 0,106 \cdot Re,$ (6)

при $Re > 200$ $Nu = 0,610 \cdot Re^{0,67}.$ (7)

Коэффициент теплоотдачи в плотном слое дисперсного материала Касик и Хаппель получили в виде [10] (справедливо для области $10^2 < Re < 10^3$ и $Pr = 0,6 \div 3,0$):

$$Nu = \frac{0,93 Re^{1/2} Pr^{1/3}}{(\varepsilon - 0,75(1 - \varepsilon)(\varepsilon - 0,2))^{1/2}} \quad (8)$$

где Re – вычислено по скорости стесненного потока.

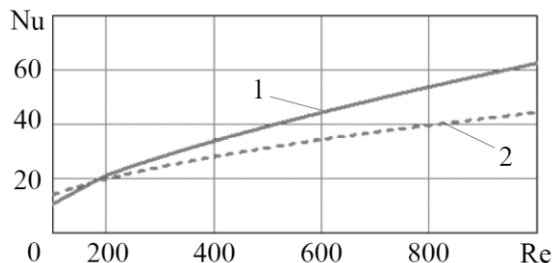


Рисунок 5 – Интенсивность конвективного теплообмена в слое дисперсного материала

1 – расчет по формулам (6), (7); 2 – расчет по формуле (8) (при $Pr=0,7$; $\varepsilon=0,45$)

На рис. 5 представлены числа Нуссельта, вычисленные с использованием зависимостей (6)-(8). В рассмотренном диапазоне чисел Рейнольдса наблюдаются расхождения в величинах интенсивности конвективного теплообмена более 20% как в одну, так и в другую стороны.

Коэффициент теплоотдачи вычисляем, используя в качестве характерного линейного размера процесса средний диаметр дисперсной частицы d_3

$$\alpha_F = Nu \frac{\lambda_B}{d_3} \quad (9)$$

При расчете процессов теплообмена в слоевых процессах рекомендуется использовать объемный коэффициент теплообмена α_V , который связан с поверхностным коэффициентом теплоотдачи соотношением [10]

$$\alpha_V = \eta \alpha_F (1 - \varepsilon) / d_3, \quad (10)$$

где η – коэффициент, зависящий от формы частиц (для цилиндрических 4,0; для сферических 6,0; для шихты шахтных печей 7,5). Величины коэффициентов объемного теплообмена α_V и теплоотдачи с поверхности α_F для условий проведения эксперимента – $Re = 500$; $Pr = 0,7$; $\varepsilon = 0,45$; $T_{B,0} = 100$ °C; $\eta = 6$ – представлены на рис. 6.

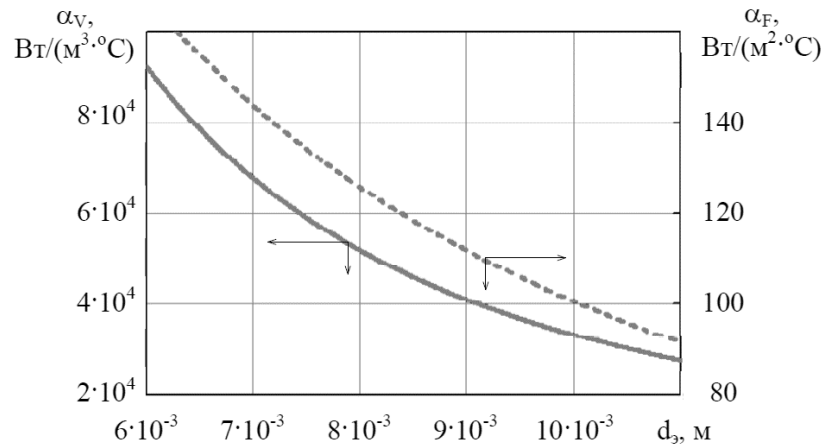


Рисунок 6 – Объемный коэффициент теплообмена и коэффициент теплоотдачи с поверхности

Теплообмен в неподвижном плотном слое удовлетворительно описывается задачей Шумана. При этом совместно рассматриваются уравнения нестационарного теплообмена твердой фазы дисперсной системы и уравнение нестационарного теплообмена потока воздуха, проходящего через дисперсную систему. Физическая формулировка задачи подразумевает, что слой дисперсного материала состоит из термически тонких частиц одинакового размера, теплообмен между потоком воздуха и слоем дисперсного материала определяется законом Ньютона, коэффициент α_F одинаков по длине и сечению слоя; теплофизические свойства воздуха и частиц не зависят от температуры; передача теплоты в воздухе и в слое теплопроводностью отсутствует; поток воздуха равномерно распределен по сечению слоя [10].

Исследуемая система имеет толщину слоя дисперсного материала – линейного размера в направлении движения воздушного потока – на порядок меньшую двух других линейных размеров системы. Ввиду этого, представляется целесообразным упростить математическое описание нестационарного процесса теплообмена в слое дисперсного материала и представить его выражением

$$\frac{d\Theta}{dFo} = \Phi \cdot \Theta, \quad (11)$$

где $\Theta = \frac{T_{B,0} - T_{M,\tau}}{T_{B,0} - T_{M,0}}$ безразмерная температура слоя дисперсного материала; $Fo = \frac{a \cdot \tau}{d_3^2}$ безразмерное время;

$\Phi = \frac{\alpha_V \cdot d_3^2}{\lambda \cdot (1 - \varepsilon)}$ постоянный безразмерный коэффициент. Уравнение (11) замыкалось следующим граничным условием $\Theta(0) = 1$. Решение уравнения (11) получено в виде

$$\Theta(Fo) = e^{-\Phi \cdot Fo}. \quad (12)$$

Решение (12) получено при допущениях, тождественных допущениям в задаче Шумана, кроме величины температуры воздуха, которая принимается постоянной и не зависящей от времени.

Экспериментальные исследования конвективного теплообмена в слое дисперсного материала

В качестве исследуемого материала использовалась базальтовая крошка из месторождения Янова Долина (Украина) (табл. 2, 3).

Исследование интенсивности конвективного теплообмена между воздушным потоком и плотным слоем твердого дисперсного материала выполняли на лабораторном стенде, принципиальная схема которого приведена на рис. 7, а технические характеристики в табл. 4.

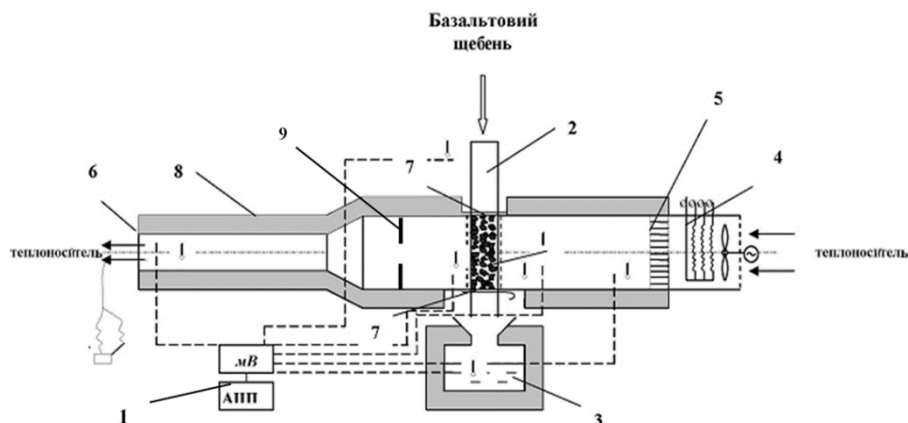


Рисунок 7 – Принципиальная схема экспериментального стенда:

1 – участок, формирующий слой базальтового щебня; 2 – камера предварительного нахождения материала; 3 – сосуд калориметрический; 4 – теплогенератор; 5 – решетка распределительная; 6 – участок измерения объемного расхода теплоносителя; 7 – клапана-отсекатели; 8 – тепловая изоляция, 9 – регулируемая заслонка, 10 - автоматизированная система контроля и учета температур.

Элементы стенда теплоизолированы (8), при составлении тепловых балансов рекуперативные потери теплоты не учитываются. В теплогенераторе (4) осуществляется автоматическое поддержание заданной температуры и расхода теплоносителя. Контроль и учет температур в различных элементах стенда осуществляется автоматизированной системой на основе приборов УКТ-38, АС-2 и ЭВМ (10).

Поток подогретого воздуха равномерно подается на распределительные решетки (5) ограничивающие объем (1), предназначенный для засыпки базальтового щебня. Толщина засыпки регулируется (контролируется) расположением распределительных решеток (5). Опыт начинается по достижении контролируемыми параметрами постоянных значений (выходу в стационарный режим). Навеска материала (базальтового щебня) помещается в камеру предварительного нахождения (2). Открывается верхний клапан-отсекатель (7) и навеска падает в экспериментальный участок (1), полностью заполняя пространство между распределительными решетками. Начинается нагрев базальтового щебня горячим воздухом. Масса навески и ее начальная температура известны. Во время опыта осуществляется непрерывный контроль температур теплоносителя до слоя, после слоя, в месте измерения расхода теплоносителя, температуры среды в сосуде калориметрическом, температуры окружающего воздуха.

Таблица 4 – Технические характеристики стенда

| № пп | Наименование характеристики | Ед.изм. | Величина |
|------|--|----------------|---------------|
| 1 | Массовый расход теплоносителя | кг/час | до 100 |
| 2 | Температура теплоносителя | °С | до 150 |
| 3 | Скорость теплоносителя в сечении перед засыпкой | м/с | до 0,8 |
| 4 | Максимальный напор в системе | Па | 80 |
| 5 | Объем камеры с материалом | м ³ | 0,001 |
| 6 | Линейные размеры камеры с материалом (высота/ ширина/ толщина) | м | 0,2/0,2/0,025 |
| 7 | Установлена электрическая мощность | кВт | до 12 |

По достижении температуры теплоносителя после слоя значения, равного значению температуры до слоя, открывается нижний клапан-отсекатель (7). Нагретая навеска падает в сосуд калориметрический (3). Масса жидкости в сосуде и ее температура известны. Масса навески известна. Средняя температура навески базальтового щебня – искомая величина. По достижении температуры в сосуде калориметрическом постоянного значения опыт прекращается. Рабочий участок (1) позволяет исследовать теплообмен в засыпках различной толщины - 15, 20, 25 мм.

Составляя тепловой баланс процесса в сосуде калориметрическом определяется количество теплоты, аккумулированное навеской базальтового щебня, и ее средняя температура. Используя уравнение теплопередачи и методику для определения поверхности контакта в засыпке с известным средним

медианным размером частицы, определяется величина среднего коэффициента теплопередачи в слое. Коэффициент интенсивности теплообмена определяется при начальном температурном напоре.

Результаты

Экспериментально определялось изменение во времени температуры потока воздуха до ($T_{B,0}$) и после ($T_{B,\tau}$) камеры с базальтовой крошкой. Приводится, определенное калориметрическим методом, значение средней температуры засыпки (\bar{T}_M). Кроме того, на рис. 8. приводится изменение во времени средней температуры засыпки ($T_{M,\tau}$) полученное расчетным путем.

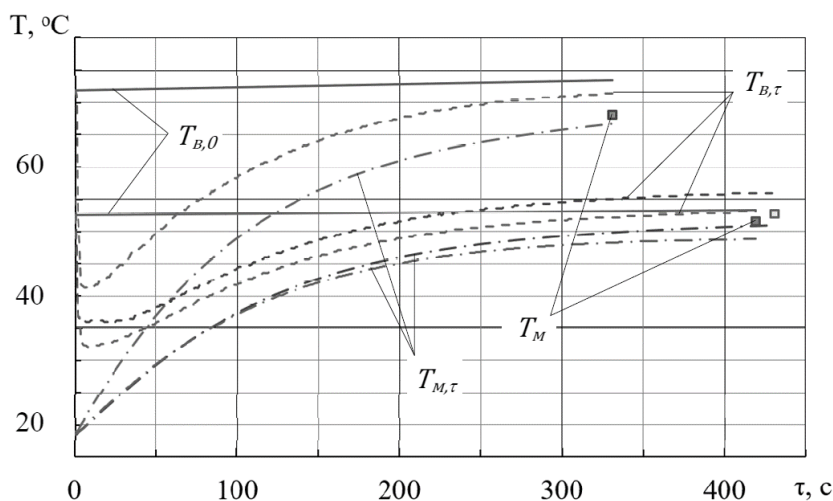


Рисунок 8 – Изменение температур воздуха и материала во времени

Результаты исследования обобщались в виде безразмерной зависимости $\Theta = f(Fo)$. На рис. 9. представлена кривая (1) ($\alpha_V = 4,3 \cdot 10^4 \text{ Вт}/(\text{м}^3 \cdot \text{°C})$), полученная с использованием зависимости (12) для условий проведения натурального эксперимента. На участке $Fo \geq 1,5$ совокупность экспериментальных точек хорошо описывается уравнением (12) с показателем $\Phi = 2,07951$, кривая (2). Показателю $\Phi = 2,07951$ соответствует значение коэффициента объемного теплообмена $\alpha_V = 10^4 \text{ Вт}/(\text{м}^3 \cdot \text{°C})$, а ему, в свою очередь, значение коэффициента теплоотдачи с поверхности $\alpha_F = 27 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$. Таким образом, на участке $Fo \geq 1,5$ значения коэффициентов теплоотдачи, определенные экспериментальным путем, отличаются от расчетных значений более чем в 4 раза.

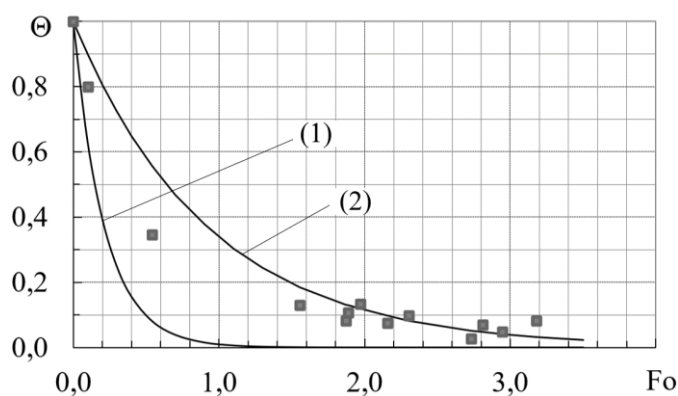


Рисунок 9 – Обобщение результатов исследований

Выводы

1. Высокая энергоемкость производства безопасной, долговечной и пожаростойкой тепловой изоляции на основе базальтовых волокон сдерживает ее широкое применение в промышленном и гражданском строительстве. В настоящее время доля энергоресурсов в себестоимости тепловой изоляции достигает 80%.

2. Использование дисперсных систем на основе пород магматического происхождения в качестве высокотемпературных насадок в системах использования ВЭР высокотемпературных продуктов сгорания природного газа позволяет вернуть (регенерировать) часть энергии в технологический процесс и существенно снизить величину энергетических потерь с продуктами сгорания.

3. В случае, когда толщина слоя дисперсной системы соизмерима с линейным размером дисперсной частицы, использование традиционных зависимостей, описывающих конвективный теплообмен в плотном неподвижном дисперсном слое, дает завышенные в 4 раза значения коэффициентов теплоотдачи с поверхности.

4. Причины отличия экспериментальных данных от результатов, полученных для плотных дисперсных слоев, видятся в: а) невыполнении условия равномерного обтекания воздушным потоком дисперсной системы – для слоев, в которых линейный размер в направлении движения воздушного потока значительно превосходит характерный линейный размер дисперсной частицы, эти эффекты нивелируются; для условно тонких слоев в которых линейный размер слоя в направлении движения теплоносителя составляет 1,5-3,0 линейных размера дисперсной частицы, выравнивания параметров воздушного потока не происходит; б) невыполнении условия равенства коэффициентов теплоотдачи по толщине слоя, как следствия неравномерности их обтекания.

Список использованной литературы

1. Джигирис Д.Д. Основы производства базальтовых волокон и изделий / Д.Д. Джигирис, М.Ф. Махова. М.: Теплоэнергетик, 2002. - 411 с.

2. Релаксационные эффекты в неравновесных конденсированных системах. Базальты: от извержения до волокна / Аблесимов Н.Е., Земцов А.Н. – Москва: РАН Дальневосточное отделение. Институт тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина, 2010. – 400 с.

3. Татаринцева О.С. Базальтовые технологии сегодня: состояние и перспективы [Электронный ресурс]: (Технология и оборудование химической, биотехнолог. и пищев. промышл.: Матер. 3-й Всес. конф. студ., аспирант. и молод. ученых с межд. участн. (28-30 апр. 2010 г., г. Бийск), В 2-х ч.; ч.1/Алт. гос. тех. ун-т, БТИ.-Бийск: Изд-во Алт. гос. тех. ун-т, 2010 - с. 7-12. Режим доступа к журн.: http://www.bti.secna.ru/mahipp/tech_obor_him_biolg_pish_prom_2010/sekcij_1.pdf Название с экрана.

4. ТУУ В.2.7.88 023.025-96 Холсты из микро, ультра, супертонких и стекломикрокристаллических стеклянных штапельных волокон из горных пород

5. Минерально-сырьевая база горных пород Украины для производства волокон. Аналитический обзор / В.И. Трефилов, М.Ф. Махова, Д.Д. Джигирис [и др.] // Промышленность строительных материалов. Серия 6. Промышленность полимерных, мягких кровельных и теплоизоляционных строительных материалов. – 1992. – Выпуск 2. – с. 88.

6. Физические свойства горных пород и полезных ископаемых (Петрофизика). Справочник геофизика/ Под. ред. Н.Б. Дортман, - 2-е изд., перераб. и доп.- М.: Недра, 1984, 455 с.

7. Муштаев В.И. Сушка дисперсных материалов / Муштаев В.И., Ульянов В.М. М.: Химия, 1988, - 352 с.

8. ГОСТ 8269.0-97* Щебень и гравий из плотных горных пород и отходов промышленного производства для строительных работ. Методы физико-механических испытаний.

9. С.С. Кутателадзе Справочник по теплопередаче / Кутателадзе С.С., Боришанский В. М. Л.; М: Госэнергоиздат, 1958, - С.138-139.

10. Б.С. Матрюков Теплофизика металлургических процессов: Учебник для вузов. / Матрюков Б.С. – М. МИСИС, 1996.- С. 52.

УДК 666.1.031.2, 666.19

Б.І. Басок, чл.-кор. НАН України, проф., д.т.н., ORCID 0000-0002-8935-4248

А.В. Тимошенко, к.т.н., ORCID 0000-0001-6840-5491

Н.С. Корбут, ORCID 0000-0003-2766-0036

Інститут технічної теплофізики НАН України

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМІНУ В ШАРІ ТВЕРДОГО ДИСПЕРСНОГО МАТЕРІАЛУ З ГІРСЬКИХ ПОРІД МАГМАТИЧНОГО ПОХОДЖЕННЯ

Причиною виникнення катастрофічних пожеж у багатопверхових житлових будинках є синтетична або, що містить синтетичні в'язучі теплова ізоляція. Стримуючим фактором до широкого впровадження ефективної, безпечної теплової ізоляції на основі базальтових волокон, що підвищує стійкість до пожеж, є її висока собівартість, обумовлена високими питомими витратами енергії на її виробництво. Одним з факторів, що підвищують енергоефективність виробництва є утилізація ВЕР високотемпературних продуктів згорання. В якості насадки високотемпературного регенеративного теплообмінного апарату розглядається дисперсна система з базальтової крихти. Мета роботи полягає в дослідженні нестационарного процесу конвективного теплообміну повітря в шарі твердого дисперсного матеріалу з гірських порід магматичного походження. Наведено характеристики базальтової сировини, визначено її структурні та лінійні властивості. Проведена аналітична оцінка інтенсивності конвективного теплообміну в насадці. Наведено опис і характеристика експериментального стенду.

Представлено результати експериментальних досліджень нестационарного конвективного теплообміну в дисперсній системі на основі базальтової крихти. Встановлено, що коефіцієнти тепловіддачі з поверхні, отримані експериментальним шляхом, для засипок дисперсних матеріалів з товщиною шару 1,5-3,0 характерних лінійних розміри дисперсної частинки виявилися в 4 рази менші значень, отриманих для щільних, протяжних шарів дисперсної системи. Висловлено припущення щодо отриманих відмінностей.

Ключові слова: теплоізоляція, базальти, конвективний теплообмін.

B. Basok, Cor. Mem. NAS of Ukraine, Prof., Dr. Eng. Sc., ORCID 0000-0002-8935-4248

A. Timoshchenko, Cand. Sc. (Eng.), ORCID 0000-0001-6840-5491

N. Korbut, ORCID 0000-0003-2766-0036

INVESTIGATION OF THE PROCESS OF CONVECTIVE HEAT EXCHANGE IN THE LAYER OF SOLID DISPERSE MATERIAL FROM MOUNTAIN ROCKS OF MAGMATIC ORIGIN

The cause of catastrophic fires in high-rise buildings is the synthetic thermal insulation or the insulation containing synthetic components. The deterrent to the widespread use of safe, fire-resistant, thermal insulation based on basalt fibers is its high cost, due to the high specific energy consumption for its production. One of the factors that increase the energy efficiency of production is the utilization of the secondary power resource of high-temperature combustion products. As the nozzle of the high-temperature regenerative heat exchanger, is considered the disperse system of the basalt rubble. The aim of the work is to study the non-stationary process of convective heat exchange of air in a layer of solid dispersed material from rocks of magmatic origin. The characteristics of basalt rubble are given, its structural and linear properties are determined. An analytical assessment of the intensity of convective heat transfer in the nozzle are carried out. The description and characteristics of the experimental stand is given. The results of experimental studies of non-stationary convective heat transfer in a dispersed system based on basalt rubble are presented. It has been established that the experimentally obtained heat transfer coefficients for nozzle of dispersed materials with a layer thickness of 1.5–3.0 characteristic linear sizes of a dispersed particle turned out to be 4 times less than the values obtained for dense, extended layers of the dispersed system. Assumptions are made regarding the differences obtained.

Key words: thermal insulation, basalts, convective heat exchange.

References

1. Dzhigiris D.D. Osnovy proizvodstva bazal'tovykh volokon i izdeliy / D.D. Dzhigiris, M.F. Ma-khova. M.: Teploenergetik, 2002. - 411 s.
2. Relaksatsionnyye efekty v neravnovesnykh kondensirovannykh sistemakh. Bazal'ty: ot izverzheniya do volokna / Ablesimov N.Ye., Zemtsov A.N. – Moskva: RAN Dal'nevostochnoye otdeleniye. Institut tektoniki i geo-fi-ziki im. YU.A. Kosygina, 2010. – 400 s.
3. Tatarintseva O.S. Bazal'tovyte tekhnologii segodnya: sostoyaniye i perspektivy [Elektronnyy re-surs]: (Tekhnologiya i oborudovaniye khimicheskoy, biotekhnolog. i pishchev. promyshl.: Mater. 3-y Vses. konf. stud., aspir. i molod. uchenykh s mezhd. uchastn. (28-30 apr. 2010 g., g. Biysk), V 2-kh ch.;ch.1/Alt. gos. tekhn. un-t, BTI.-Biysk: Izd-vo Alt. gos. tekhn. un-t, 2010 - c. 7-12. Rezhim dostupa k zhurn.: http://www.bti.secna.ru/mahipp/tech_obor_him_biolog_pish_prom_2010/sekciy_1.pdf Nazvaniye s ekrana.
4. TUU V.2.7.88 023.025-96 Kholsty iz mikro, ul'tra, supertonkikh i steklomikrokristallicheskikh steklyannykh shtapel'nykh volokon iz gornykh porod.
5. Mineral'no-syr'yevaya baza gornykh porod Ukrainy dlya proizvodstva volokon. Analiticheskiy obzor / V.I. Trefilov, M.F. Makhova, D.D. Dzhigiris [i dr.] // Promyshlennost' stroitel'nykh materialov. Seriya 6. Promyshlennost' polimernykh, myagkikh krovel'nykh i teploizolyatsionnykh stroitel'nykh materialov. – 1992. – Vypusk 2. – s. 88.
6. Fizicheskiye svoystva gornykh porod i poleznykh iskopayemykh (Petrofizika). Spravochnik geofizi-ka/ Pod. red. N.B. Dortman, - 2-ye izd., pererab. i dop.- M.: Nedra, 1984, 455 s.
7. Mushtayev V.I. Sushka dispersnykh materialov / Mushtayev V.I., Ul'yanov V.M. M.: Khimiya, 1988, - 352 s.
8. GOST 8269.0-97* Shcheben' i graviy iz plotnykh gornykh porod i otkhodov promyshlennogo proizvodstva dlya stroitel'nykh rabot. Metody fiziko-mekhanicheskikh ispytaniy.
9. S.S. Kutateladze Spravochnik po teploperedache / Kutateladze S.S., Borishanskiy V. M. L.; M: Gosenergoizdat, 1958, - S.138-139.
10. B.S. Mastyukov Teplofizika metallurgicheskikh protsessov: Uchebnyk dlya vuzov. / Mastyukov B.S. – M. MISIS , 1996.- S. 52.

Надійшла 13.08.2018

Received 13.08.2018

УДК 532.542

А.А. Баскова, аспирант, ORCID 0000-0003-2864-8995
Г.А. Воропаев, д-р. физ. мат. наук, проф., ORCID 0000-0001-5615-6344
Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ ГОФРИРОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА СТРУКТУРУ ТЕЧЕНИЯ И ИНТЕНСИВНОСТЬ ТЕПЛООБМЕНА В ТРУБЕ

Проведено численное моделирование тепловых и гидродинамических процессов в трубах с гофрированными вставками различных геометрических параметров. На основании двух введенных безразмерных параметров: длины волны $k_1=l/R$ и амплитуды гофрированной поверхности $k_3=2a/R$ выполнен анализ структуры вихревого течения в трубе и теплообмена на её поверхности. Показана взаимосвязь этих параметров с определяющим числом Рейнольдса Re_d и длиной начального участка трубы. Определено необходимое количество волн в зависимости от их длины для установления автомодельного режима течения. Найдено значение параметров k_1, k_3 в зависимости от числа Re_d , при которых значение перепада давления в гофрированной трубе минимально превышает значение перепада давления в гладкой трубе, а теплообмен максимален по сравнению с гладкой трубой. Полученные значения перепада давления в трубе с гофрированной вставкой не превышают значения в гладкой трубе более, чем на 4 %, что позволяет определять энергоэффективность труб с незагромождающим гофром только по значениям чисел Нуссельта.

Ключевые слова: течение в трубе, интенсификация теплоотдачи, гидравлическое сопротивление, структура течения, завихренность потока, незагромождающий гофр.

Вступление

Гофрирование – один из наиболее распространенных методов структурирования теплообменных поверхностей, нашедший широкое применение при разработке новых и реконструкции уже существующих теплообменных аппаратов в энергетике и промышленности. Эффективность данного метода интенсификации теплообмена определяется прежде всего геометрией развитой поверхности. Правильный подбор геометрических параметров гофрирования позволяет не только увеличить коэффициент теплоотдачи, но и снизить сопутствующие гидравлические потери при соответствующем числе Рейнольдса. Анализ влияния геометрических параметров гофрированной поверхности в определенных диапазонах чисел Рейнольдса и Прандтля посвящено достаточно много работ [1-5].

Энергетическая эффективность структурированной поверхности, которая определяется отношением интенсивности теплообмена к гидравлическим потерям на ее осуществление, зависит и от режима течения, и от физических свойств теплоносителя, что и определяет индивидуальные свойства геометрии теплообменной поверхности. В зависимости от сочетания этих параметров теплоотдача может возрастать в несколько раз по сравнению с гладкой поверхностью при пропорциональном росте гидравлического сопротивления [3, 4]. Однако эффективной теплообменной поверхностью становится только в случае, когда теплоотдача на ней возрастает существенно больше, чем ее гидравлическое сопротивление, что и определяет условие выбора геометрии теплообменной поверхности в заданном диапазоне чисел Рейнольдса. Общее гидравлическое сопротивление трубы можно варьировать с помощью частичного гофрирования поверхности, обеспечивающего накопление возмущений вниз по потоку на определенной длине и увеличивающего теплообмен не только на гофрированной поверхности, но и в следе за ней. Такого типа развитые поверхности изучены мало.

Цель и задание работы

Целью проведенного численного исследования является:

- 1) установление взаимосвязи теплогидравлических характеристик внутреннего течения в трубе с геометрическими параметрами гофрированной поверхности трубы в заданном диапазоне чисел Рейнольдса при учете зависимости физических параметров теплоносителя от температуры.
- 2) на основании численного эксперимента предложить рекомендации по проектированию теплообменных поверхностей, интенсифицирующих теплообмен при минимальных гидравлических потерях.

Постановка задачи

Задача интенсификации теплообмена рассматривается в определенном диапазоне чисел Рейнольдса и Прандтля, что обусловлено зависимостью интенсивности теплообмена от особенностей формирования пограничного слоя и его вихревой структуры на начальном участке трубы при переходных числах Рейнольдса. При этом необходимо учитывать зависимость структуры течения не только от вида обтекаемой поверхности, но и от изменения теплофизических свойств теплоносителя, обусловленных неизотермичностью потока.

В данной работе основное внимание уделено взаимосвязи теплообмена в гофрированной трубе со структурой вихревого течения и возникающими низкочастотными пульсациями давления в рассмотренном диапазоне чисел Рейнольдса. В продолжение работы [6] выполнено исследование взаимосвязи локальной теплоотдачи и структуры течения в зависимости от отношения амплитуды волны гофра к ее длине на гофрированной поверхности в определенном диапазоне чисел Рейнольдса.

Рассматривается осесимметричное течение вязкой теплопроводной несжимаемой среды (вода) на начальном участке гладкой трубы с гофрированной вставкой конечной длины.

На рис. 1 представлена геометрия исследуемой трубы, состоящей из входного патрубка, гофрированной вставки фиксированной длины $S/R_0 = 8$ и выходного патрубка.

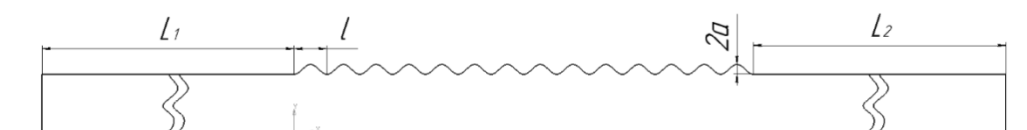


Рисунок 1 - Геометрия исследуемой трубы

Рассматривается осесимметричное синусоидальное гофрирование относительно радиуса $R+a$, где $R = 35$ мм, a – амплитуда синусоиды. Такая поверхность трубы не имеет локальных радиусов меньше R – не загромождающий гофр. Длина входного патрубка $L_1 = 1500$ мм, гофрированной вставки $S = 280$ мм, выходного патрубка $L_2 = 1360$ мм.

Проанализированы две длины волны: $l = 10$ мм, 40 мм, которые можно охарактеризовать как длинноволновое и коротковолновое гофрирование при разных амплитудах. Параметры гофрированной вставки представлены в табл. 1:

Таблица 1 - Геометрические параметры гофрированной вставки

| Длина волны гофра l , мм | Глубина волны гофра a , мм | Соотношение длины волны к радиусу трубы, $k_1=l/R$ | Соотношение глубины волны к её длине, $k_2=2a/l$ | Соотношение глубины волны к радиусу трубы, $k_3=2a/R$ |
|----------------------------|------------------------------|--|--|---|
| 40 | 1,5 | 1,14 | 0,075 | 0,09 |
| 40 | 3 | 1,14 | 0,15 | 0,17 |
| 40 | 4,5 | 1,14 | 0,225 | 0,26 |
| 40 | 7 | 1,14 | 0,35 | 0,40 |
| 10 | 1 | 0,29 | 0,2 | 0,06 |
| 10 | 1,5 | 0,29 | 0,3 | 0,09 |
| 10 | 3 | 0,29 | 0,6 | 0,17 |
| 10 | 4,5 | 0,29 | 0,9 | 0,26 |

Течение вязкой теплопроводной жидкости в трубе с гофрированной вставкой описывается классической системой уравнений, записанной в осесимметричном виде [7]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial V_r}{\partial \tau} + V_r \frac{\partial V_r}{\partial r} + V_z \frac{\partial V_r}{\partial z} = \\ = \frac{1}{\rho} \left(-\frac{\partial P}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial r} \left(\mu \frac{\partial V_r}{\partial r} \right) + \frac{\mu}{r} \frac{\partial V_r}{\partial r} - \frac{\mu V_r}{r^2} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial V_r}{\partial z} \right) \right), \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial V_z}{\partial \tau} + V_r \frac{\partial V_z}{\partial r} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} = \\ = \frac{1}{\rho} \left(-\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial r} \left(\mu \frac{\partial V_z}{\partial r} \right) + \frac{\mu}{r} \frac{\partial V_z}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) \right), \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial (rV_r)}{\partial r} + \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} + V_r \frac{\partial T}{\partial r} + V_z \frac{\partial T}{\partial z} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), \quad (4)$$

где μ – переменный коэффициент динамической вязкости представлен зависимостью [8]:

$$\mu = 2,791 \cdot 10^{-7} \cdot T^2 - 1,885706 \cdot 10^{-4} \cdot T + 0,03231448$$

При проведении численного эксперимента рассмотрены следующие граничные условия:

– на входе задается среднерасходная скорость $V = (0,03 \dots 0,1)$ м/с и температура теплоносителя $T = 60$ °С;

– на выходном сечении – условие «outflow»;

– на поверхности трубы – условие прилипания и постоянная температура $T = 10$ °С.

Рассмотренному диапазону среднерасходных скоростей и температур на стенке трубы соответствуют следующие диапазоны чисел Рейнольдса $Re_d = 1,6 \cdot 10^3 \dots 5,4 \cdot 10^3$ и Прандтля $Pr = 3,00 \dots 9,41$.

Задача решалась численно в пакете Fluent в сочетании с генератором разностных сеток Gambit. Фрагмент структурированной сетки со сгущением к стенке трубы приведен на рис. 2:

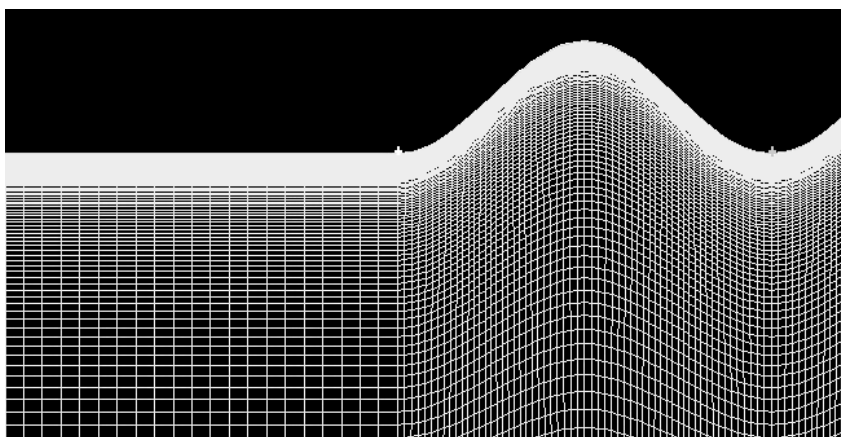


Рисунок 2 - Фрагмент структурированной сетки расчетной области

Параметры сетки варьировались:

- по оси OX применялся постоянный шаг в диапазоне $\Delta x = (0,33 \dots 1)$ мм,
- по оси OY применялся переменный шаг: $\Delta y_{\min} = (0,0022 \dots 0,06)$ мм, с коэффициентом нарастания величины шага $a = 1,05$.

Общее количество ячеек – до 500000.

Результаты численного эксперимента

Изменение амплитуды незагромождающего гофрирования поверхности трубы при длинах волн, сопоставимых с радиусом трубы, должно приводить к периодическому изменению площади сечения трубы и соответствующему периодическому локальному изменению среднерасходной скорости и давления при ламинарном течении в трубе.

При $l \ll R$, независимо от амплитуды гофрирования, изменением среднерасходной скорости по длине волны можно пренебречь. Все изменения параметров потока происходят в районе поверхности трубы и в зависимости от амплитуды гофрирования и числа Рейнольдса, что может соответствовать течению в шероховатых трубах. Но для незагромождающего гофрирования при малых числах Рейнольдса пренебрегают изменением градиента давления по сравнению с градиентом давления в гладкой трубе, так как вихревые течения внутри углублений гофра устойчивы независимо от их глубины.

При гофрировании с длинами волн $l \sim R$ задача становится многопараметрической, так как параметры течения зависят не только от числа Рейнольдса по радиусу трубы и по длине волны гофрирования, но и от амплитуды гофрирования, из-за необходимости учета эффекта периодической конфузурности. Но эта периодичность слабо влияет на перепад давления по длине трубы. Так при максимальной амплитуде гофра общие гидравлические потери возросли по сравнению с гладкой трубой не более, чем на 5%.

Переходные режимы течения, которые устанавливаются в трубе при рассмотренных числах Рейнольдса и температурном поле теплоносителя, характеризуются потерей устойчивости потока уже на начальном участке трубы. Возмущения потока нарастают по длине трубы. Область конечных возмущений в трубе локализуется при числах Рейнольдса, взятых по длине невозмущенного участка: $Re \sim 70000 \dots 115000$, которая начинает устанавливаться через характерное время расчета $\tau_0 = L/V$, где L - длина расчетной области, V - среднерасходная скорость. При $\tau > 2\tau_0$ расчет выходит на квазипериодические осцилляции перепада давления при постоянном значении давления на входе в трубу.

Динамику изменений значений перепада давления в трубе (рис. 3) можно связать с процессом вихреобразования и со скоростью переноса возникающих крупномасштабных вихрей вниз по потоку.

Гофрированная вставка располагалась ниже по потоку от области возникновения конечных возмущений в трубе, и ее можно не считать источником первоначальных возмущений.

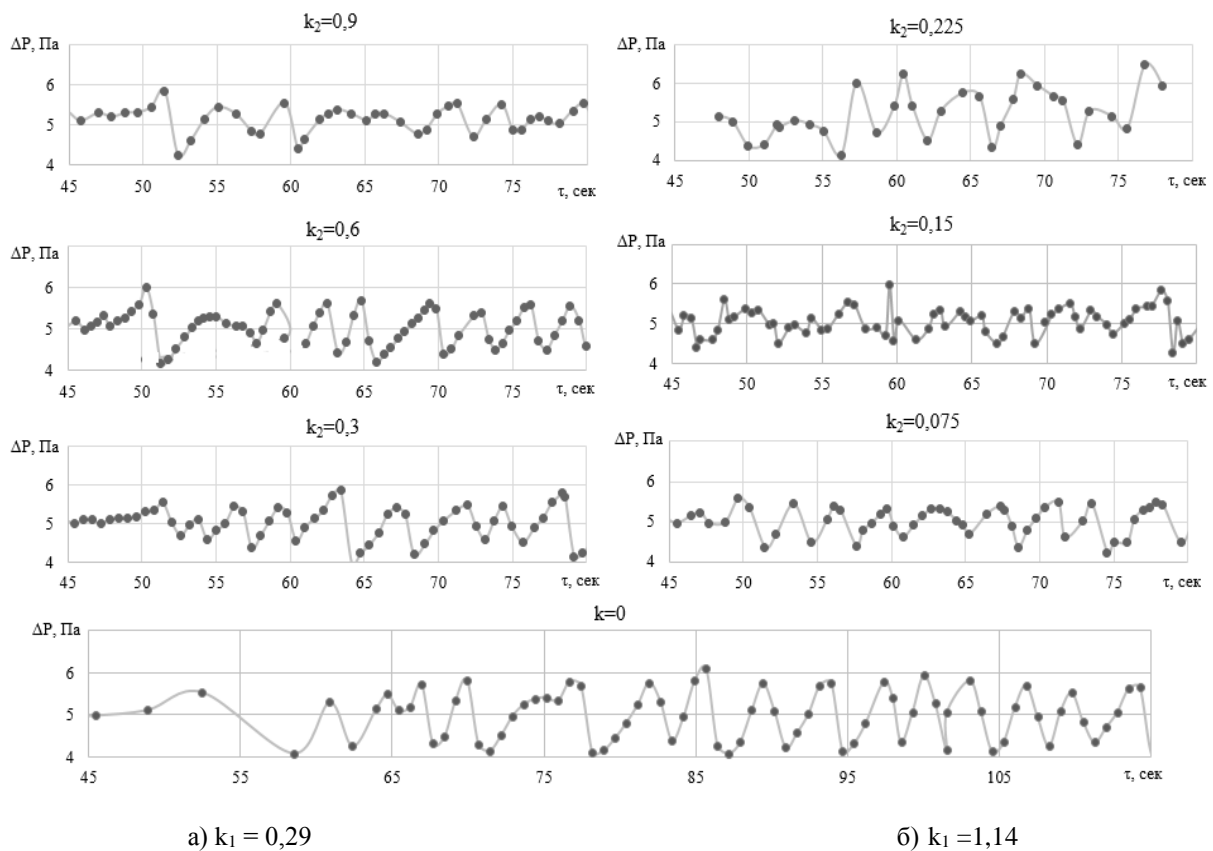
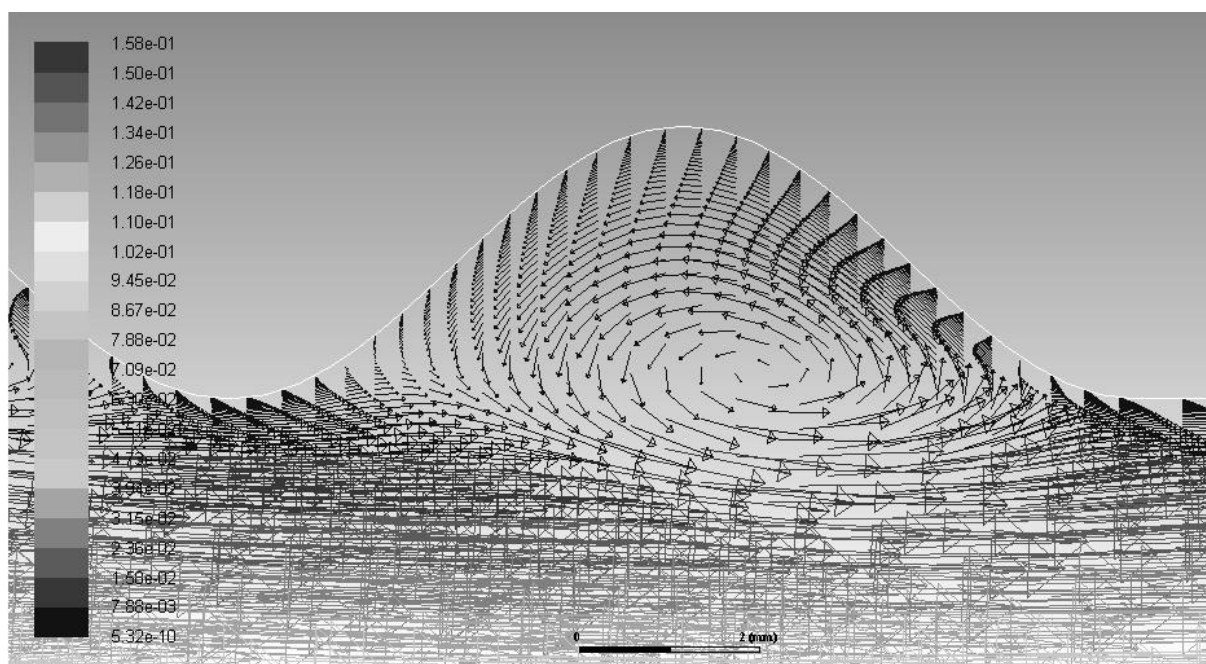


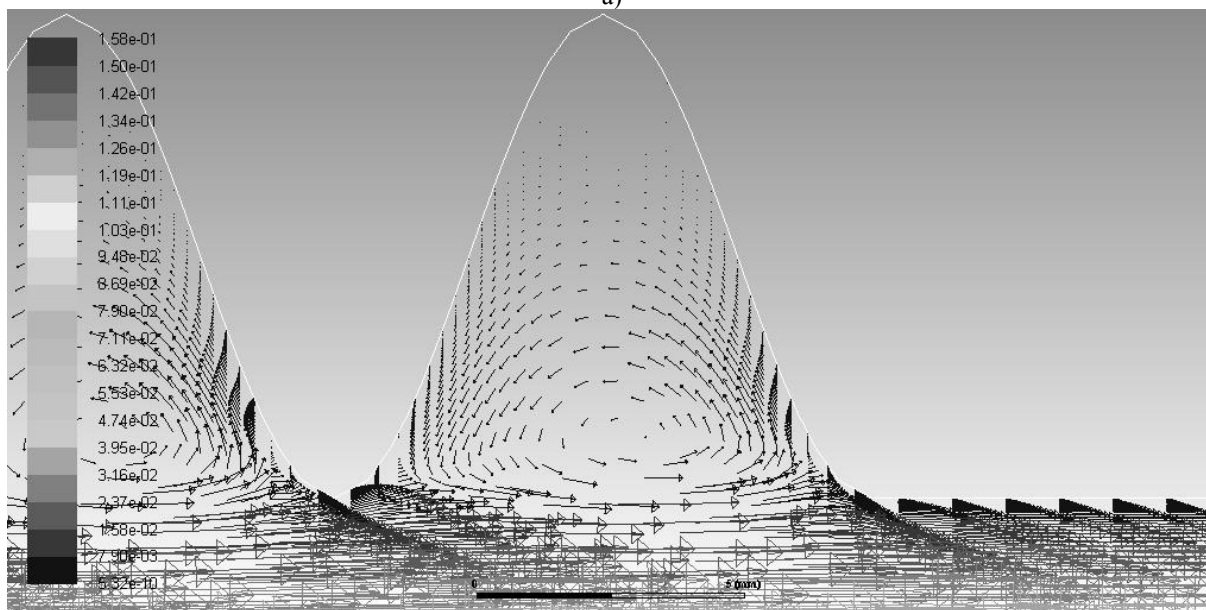
Рисунок 3 – Мгновенные значения перепада давления

Анализ численных результатов параметров течения на начальном участке трубы при переходных числах Рейнольдса показал достаточно узкий диапазон чисел Re_x , при котором формируются низкочастотные возмущения конечной амплитуды, параметры которых слабо зависят от выбранных параметров сетки. Введение гофрированных вставок рассмотренных геометрических параметров уменьшает амплитуду колебаний давления, что говорит об уменьшении скорости нарастания возмущений в потоке.

Амплитуда и длина волны гофра определяют структуру вихревого течения внутри него. На рис.4 показаны мгновенные значения завихренности внутри впадин гофрированной поверхности различной глубины ($k_2 = 0,3$; $k_2 = 0,9$) при малой длине волны $k_1 = 0,29$ и среднерасходной скорости $V = 0,1$ м/с. Эти безразмерные значения углублений соответствуют общепринятым понятиям мелкого и глубокого углубления соответственно. В относительно мелком углублении, вихрь имеет характерный размер равный глубине впадины и вовлекает в движение практически весь ее объем, в то время как в глубоком образуется застойная зона жидкости.



а)



б)

Рисунок 4 – Векторные поля скорости в гофрах различной глубины:
а – $k_2 = 0,3$; б – $k_2 = 0,9$, $k_1 = 0,29$ при $Re = 0,54 \cdot 10^4$

При рассмотренном числе Рейнольдса по длине волны ($Re_l = 770$) внутри углубления формируется один вихрь практически по центру впадины, несколько смещенный к ее наветренной стороне. Формирование вихревого течения внутри углублений гофра существенно изменяет не только величины напряжений сдвига на гофрированной поверхности, но и знак напряжений: так благодаря образованию циркуляционного вихревого течения напряжение сдвига внутри углубления становится отрицательным, на гребнях гофра напряжения сдвига существенно превышают напряжение сдвига в гладкой трубе при соответствующем значении числа Рейнольдса.

В соответствии со структурой вихревого течения в углублениях изменяется теплообмен. Так при увеличении амплитуды коротковолнового гофра ($k_1=0,29$) конвективная составляющая теплообмена уменьшается под влиянием образующейся застойной зоны (рис. 5):

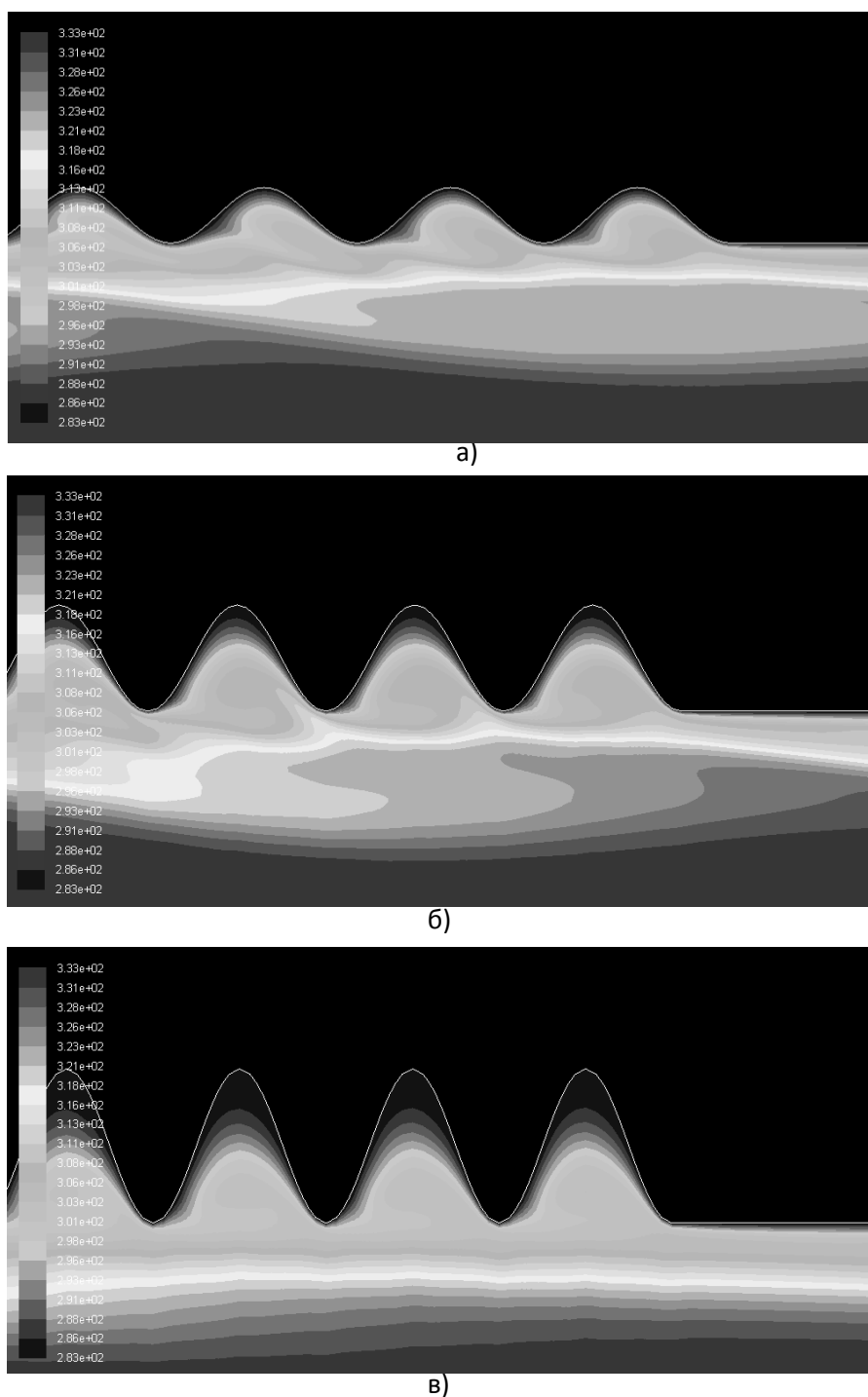
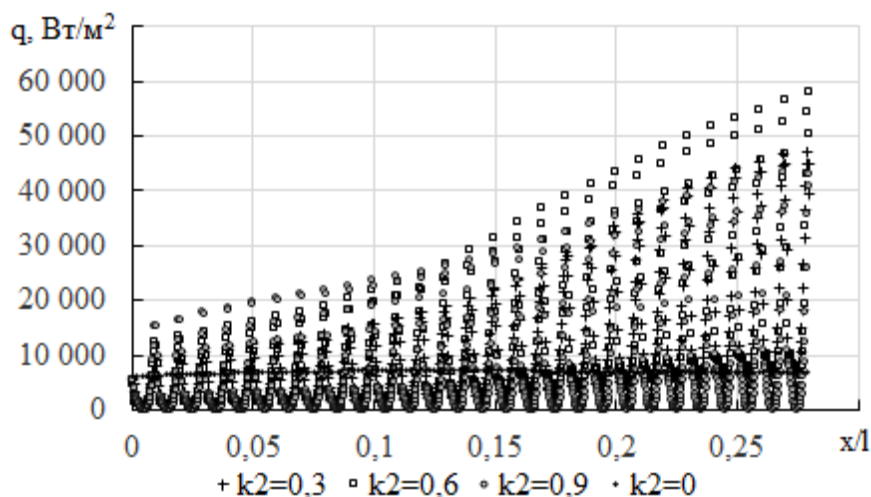


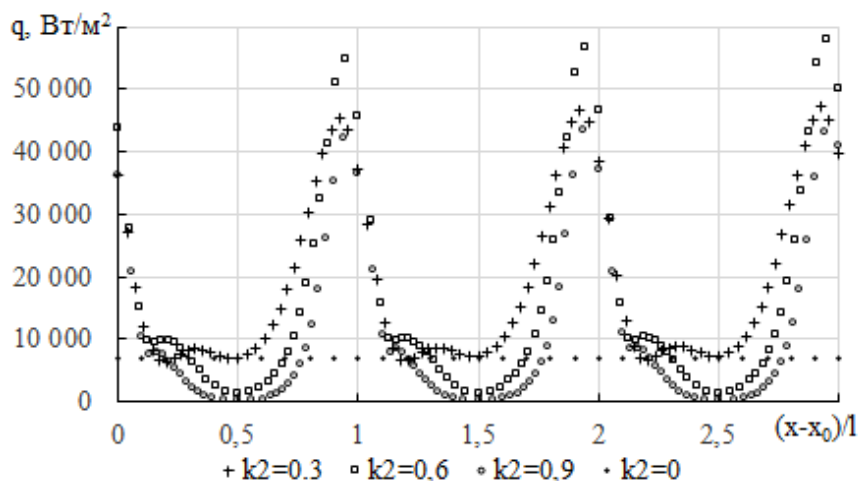
Рисунок 5 – Температурные поля в гофрах с различной глубиной углубления:
 а – $k_2 = 0,3$; б – $k_2 = 0,6$, в - $k_2 = 0,9$; $k_1 = 0,29$ при $Re = 0,54 \cdot 10^4$

При рассмотрении процессов передачи теплоты необходимо учитывать изменение теплообмена как за счёт изменения структуры течения, так и за счёт развития теплоотдающей поверхности. Увеличение площади теплообмена гофрированной поверхности частично компенсирует снижение теплоотдачи, однако большая стабилизация потока при $k_2 > 0,6$ приводит к снижению теплоотдачи как на гофрированном участке, так и на выходном патрубке, где течение становится менее возмущенным по сравнению с гладкой трубой при данном числе Рейнольдса.

Расположение волны гофра по длине вставки влияет на структуру течения и теплообмен в гофре. От гофра к гофру завихренность в углублении растёт, как и интенсивность теплообмена. Наибольшее значение плотности теплового потока на длине волны гофра, как и следовало ожидать, приходится на гребень гофра, где толщина пограничного слоя минимальна (рис. 6):



а)



б)

Рисунок 6 – Плотность теплового потока на: а - гофрированной вставке и б - в трех последних углублениях коротковолнового гофра различной глубины

Длинноволновая гофрированная вставка ($k_1 = 1,14$) при числе Рейнольдса по длине волны гофра $Re_l = 3000$ в рассмотренном диапазоне амплитуд демонстрирует не только увеличение теплообмена с увеличением амплитуд, но и увеличение плотности потока теплоты на единицу площади. По интенсивности теплообмена наиболее эффективной оказалась геометрия лунки, характеризующаяся коэффициентом $k_2 = 0,225$, что обусловлено как организацией структуры течения без зоны застоя, так и развитием теплоотдающей поверхности. Благодаря более интенсивному вихревому течению в

углублениях гофра теплоотдача превосходит теплоотдачу в гладкой трубе не только на вершинах гофров, но и в углублениях (рис. 7):

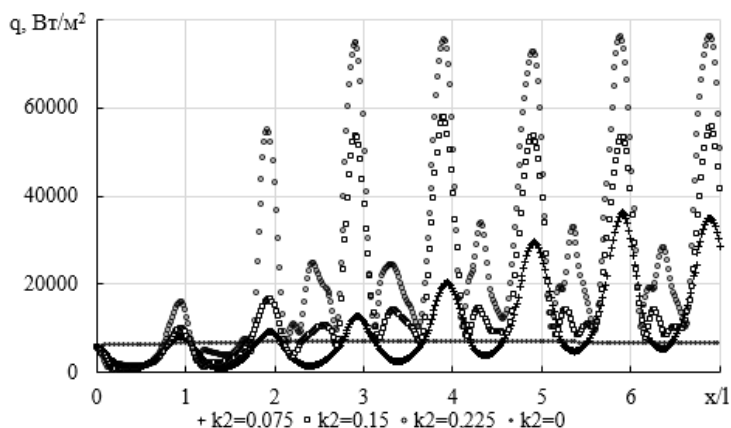


Рисунок 7 - Плотность теплового потока в длинноволновом гофре при различной амплитуде

Интенсивное нестационарное вихревое течение внутри длинноволновых углублений способствуют образованию многоточечной структуры течения (рис. 8), разрушающей пограничный слой на стенках внутри гофра, благодаря чему формируется единая зона повышенной теплоотдачи.

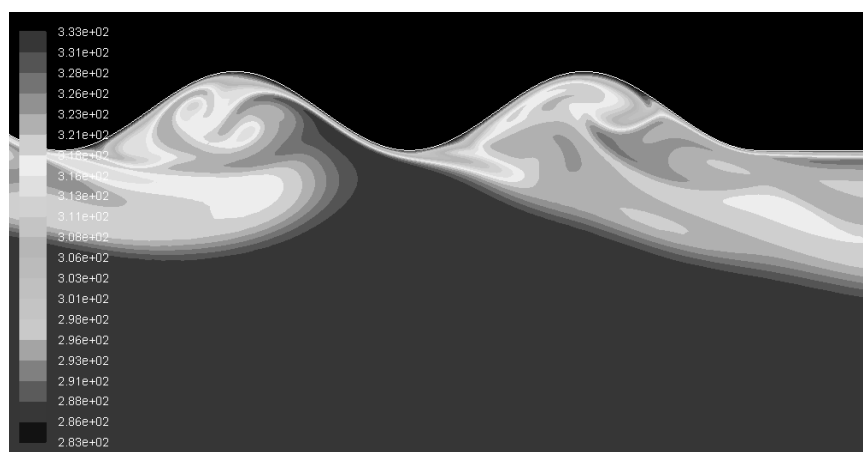


Рисунок 8 – Температурное поле в двух последних гофрах, $k_2=0,225$

Безразмерные тепло-гидравлические характеристики труб с гофрированной вставкой, отнесенные к тепло-гидравлическим характеристикам гладкой трубой при числе Рейнольдса $5,4 \cdot 10^3$, представлены в Таблице 2. С увеличением k_1 растет теплообмен и имеет экстремальное значение при определенном k_2 , т.е. для фиксированной длины волны существует оптимальная амплитуда гофра, что объясняется структурой вихревого течения внутри углубления. При стремлении отношения $k_2 \rightarrow 0$ и конечных значениях k_1 , имеем аналог течения в гладкой трубе. При $k_2 > 0,5$ внутри углублений формируется застойная зона, что делает бесполезным дальнейшее увеличение амплитуды гофра.

Таблица 2 – Тепло-гидравлические параметры труб с гофрированной вставкой по сравнению с гладкой трубой

| Геометрия углубления гофра | $\Delta P/\Delta P_{гп}$ | $Nu/Nu_{гп}$ | Re_1 |
|----------------------------|--------------------------|--------------|--------|
| $k_1=0,29, k_2=0,3$ | 0,99 | 1,02 | 770 |
| $k_1=0,29, k_2=0,6$ | 1,00 | 1,04 | 770 |
| $k_1=0,29, k_2=0,9$ | 1,02 | 0,92 | 770 |

Продолжение таблицы 2

| | | | |
|-----------------------|------|------|------|
| $k_1=1,14, k_2=0,075$ | 1,00 | 1,07 | 3080 |
| $k_1=1,14, k_2=0,15$ | 1,02 | 1,29 | 3080 |
| $k_1=1,14, k_2=0,225$ | 1,04 | 1,45 | 3080 |
| $k_1=1,14, k_2=0,35$ | 1,04 | 1,59 | 3080 |

Гофрированные поверхности труб характеризуются длиной и амплитудой волны гофра при конкретном радиусе трубы, поэтому эффект влияния такой поверхности на структуру течения в трубе оценивается безразмерными параметрами $k_1 = l/R$, $k_3 = 2a/R$. Представив отношение интенсивности теплоотдачи на гофрированной поверхности к теплоотдаче на гладкой трубе в виде функции двух параметров k_1 и k_3 (рис.9), имеем возможность по экстремальным точкам этой поверхности получить значения параметра $k_2 = 2a/l$, при котором тепловой поток будет максимальным в рассматриваемом диапазоне чисел Рейнольдса.

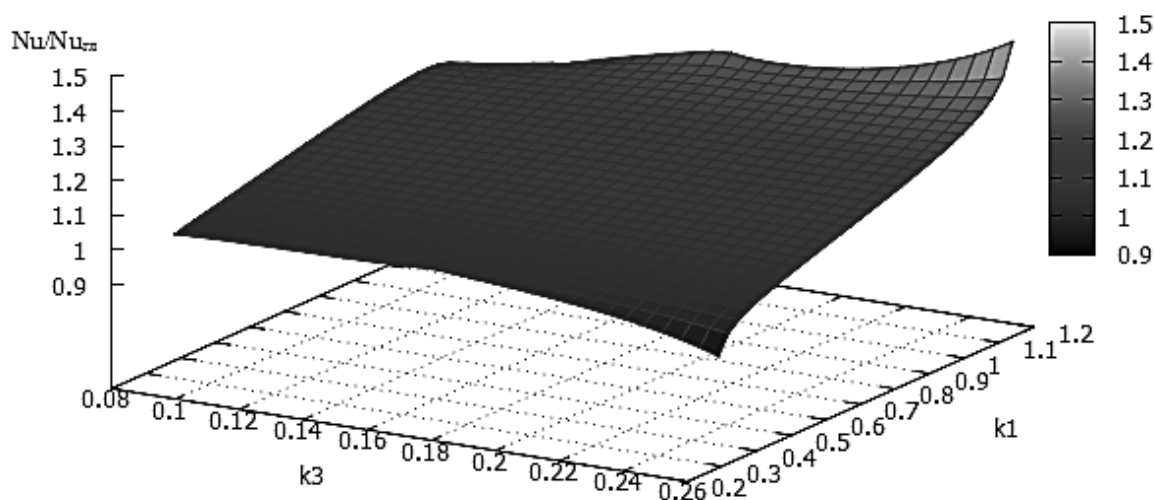


Рисунок 9 - Зависимость безразмерного теплового потока от геометрических параметров гофрированной трубы

Однако экстремальное значение теплообмена при увеличении амплитуды для длинноволнового гофра не позволяет дать однозначный ответ по выбору параметра k_2 , в связи с нарастанием возмущений по длине трубы и проявлением влияния числа волн на единицу длины трубы на интенсивность теплообмена. Вместе с тем, для коротковолновых гофров значение такого параметра определяется достаточно однозначно и близко к 0,6. Это может быть следствием приближения к предельному числу Рейнольдса по длине гофра, которое определяет структуру течения, а, следовательно, и теплообмен на длине волны гофра. Дальнейшее увеличение длины волны гофра требует перехода к моделированию турбулентного режима течения, либо к более жестким требованиям к численному моделированию на основании уравнений Навье-Стокса.

Выводы

1. В рассмотренном диапазоне переходных чисел Рейнольдса показано, что незагромождающие гофрированные вставки интенсифицируют теплообмен.
2. Определены оптимальные значения параметров k_1 , k_3 , при которых реализуется теплообмен, превышающий теплообмен в гладкой трубе для фиксированных значений чисел Рейнольдса Re_a .
3. Показано, что увеличение теплообмена в трубах с длинноволновой гофрированной вставкой на (5...50) % больше, чем при коротковолновых гофрированных вставках.
4. Среди коротковолновых вставок наиболее эффективными оказались вставки с параметром $k_2=0,6$, среди длинноволновых наиболее эффективными оказались вставки с меньшей амплитудой $k_2=0,25$.

5. При незагромождаючому гофруванні перепад тиску в трубі з гофрованою вставкою різних параметрів k_1 , k_3 відрізняється від перепаду тиску в гладкій трубі при відповідних числах Рейнольдса не більше ніж на 4%, тому коефіцієнт ефективності застосування таких труб можна визначати тільки по відношенню чисел Нуссельта в трубі з вставкою і гладкою трубою.

Дальніші дослідження труб з розвинутою поверхнею можуть бути проведені при розширенні діапазону режимних параметрів течії і геометричних характеристик поверхні. Необхідно також аналізувати вплив довжини гофрованих ділянок, відстані між ними на енергетичну ефективність теплообмінника.

Список использованной литературы

1. Zaid, S. Heat transfer enhancement in two-start spirally corrugated tube [Text] / S. Zaid, M. N. Mohd Jaafar, Tholudin M. Lazim, A. Shahrir, Ammar F. Abdul Wahid // Alexandria Engineering Journal. – 2015. – Vol. 54. – P. 415–422.
2. Sreedhara Rao, B. Effect of corrugation angle on heat transfer studies of viscous fluids in corrugated plate heat exchangers [Text] / B. Sreedhara Rao, D. Surywanshi Gajanan, S. Varun, M. V. S. Murali Krishna, R. C. Sastry // International Journal of Engineering and Technology Innovation. – 2015. – Vol. 5, №2. – P. 99–107.
3. Vicente, P. G. Experimental investigation on heat transfer and frictional characteristics of spirally corrugated tubes in turbulent flow at different Prandtl numbers [Text] / P. G. Vicente, A. Garc, A. Viedma // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2004. – Vol. 47. – P. 671–681.
4. Zimparov, V. D. / Heat transfer and friction characteristics of spirally corrugated tubes for power plant condensers – 1. Experimental investigation and performance evaluation [Text] / V. D. Zimparov, N. L. Vulchanov, L. B. Delov // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 1990. – Vol. 34, №9. – P. 2187–2197.
5. Nyarko, I. P. R. Heat load and its effects on fluid friction factor in corrugated pipes [Text] / I. P. R. Nyarko // American journal of scientific and industrial research. – 2012. – Vol. 3 (4). – P. 241–251.
6. O. Baskova Investigation of flow structure and heat exchange formation in corrugated pipes at transient Reynolds numbers / Baskova O., Voropaiev G. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – vol. 3/8 (87). – P. 40-45.
7. Лойцянский, Л. Г. Механика жидкости и газа [Текст] / Л. Г. Лойцянский. – М. : Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1950. - 680 с.
8. Ривкин, С. Л. Термодинамические свойства воды и водяного пара [Текст] : справочник / С. Л. Ривкин, А. А. Александров ; Рек. Гос. службой стандартных справочных данных – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 80 с. с ил.

УДК 532.542

О.О. Баскова, аспірант, ORCID 0000-0003-2864-8995

Г.А. Воропаєв, д-р. фіз. мат. наук, проф., ORCID 0000-0001-5615-6344

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ВПЛИВ ГЕОМЕТРІЇ ГОФРОВАНОЇ ПОВЕРХНОСТІ НА СТРУКТУРУ РУХУ ТА ІНТЕНСИВНІСТЬ ТЕПЛООБМІНУ В ТРУБІ

Проведено чисельне моделювання теплових та гідравлічних процесів у трубах з різними геометричними параметрами гофрованих вставок. Показано, що в діапазоні кількості Рейнольдса $1,6 \cdot 10^3 \dots 5,4 \cdot 10^3$ вставка неприкріплених гофрованих вставок дозволяє інтенсифікувати теплообмін до 1,6 рази. На основі двох безрозмірних параметрів: довжини хвилі $k_1 = l/R$ та амплітуда гофрованої поверхні $k_3 = 2a/R$ проведено аналіз вихрової структури потоку в механізмах трубопроводів і теплообміну. Показано взаємозв'язок між цими параметрами та кількістю Рейнольдса Re_d та довжиною початкової ділянки труби. Проведено порівняльний аналіз короткохвильового та довгохвильового гофрування. Отримано необхідну кількість хвиль залежно від їх довжини для встановлення самоподобного режиму течії. Зроблено рекомендації щодо моделювання термічних та гідравлічних процесів в залежності від геометрії структурованої поверхні. Значення параметрів k_1 , k_3 визначали для Re_d , для якого величина гідравлічного опору в гофрованому трубі була мінімальною, а швидкість теплопередачі була максимальною у порівнянні з гладкою трубкою. Отримані значення гідравлічного опору в трубах з гофрованими вставками не перевищують значення гідравлічного опору в плавному трубопроводі більше

4%, що дозволяє визначити енергоефективність труб з непривабливими гофрованими вставками лише за номером Нюсельта.

Ключові слова: протікання в трубі, інтенсифікація тепловіддачі, гідравлічна стійкість, структура течії, зміна потоку, незахищувальний гофр.

O. Bascova, PhD, ORCID 0000-0003-2864-8995

G. Voropaiev, Prof., ORCID 0000-0001-5615-6344

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

INFLUENCE OF GEOMETRY OF CORRUGATED SURFACE ON THE STRUCTURE OF CURRENT AND INTENSITY OF HEAT TRANSFER IN A PIPE

Numerical modeling of thermal and hydraulic processes in pipes with a different geometry parameters corrugated inserts was carried out. It was shown that in the range of Reynolds numbers $1,6 \cdot 10^3 \dots 5,4 \cdot 10^3$ insertion of nonencumbering corrugated inserts allows to intensify heat exchange to 1,6 times. On the base of two dimensionless parameters: wavelength $k_1=l/R$ and amplitude of corrugated surface $k_3=2a/R$ the analysis of flow's vortex structure in pipe and heat transfer mechanisms was carried out. Interrelation between those parameters and Reynolds number Re_d and length of initial section of the pipe was shown. Comparative analysis of shortwave and long-wave corrugation was carried out. Required number of waves depending on their length for the self-similar flow regime establishing was obtained. Recommendations on modeling of thermal and hydraulic processes depending on structured surface's geometry were made. Value of the parameters k_1, k_3 was determined for the Reynolds Re_d for which value of hydraulic resistance in corrugated pipe was a minimal growth and heat transfer rate was a maximal in compared to smooth tube. The obtained values of hydraulic resistance in pipes with corrugated inserts do not exceed value of hydraulic resistance in smooth pipe more than 4%, which allows determine energy efficiency of pipes with nonencumbering corrugated inserts only by Nusselt number.

Key words: flow in the pipe, intensification of heat transfer, hydraulic resistance, flow structure, flow change, non-protective corrugation.

References

1. S. Zaid et al., "Heat transfer enhancement in two-start spirally corrugated tube," Alexandria Engineering Journal, vol. 54, pp. 415–422, 2015.
2. B. Sreedhara Rao et al., "Effect of corrugation angle on heat transfer studies of viscous fluids in corrugated plate heat exchangers," International Journal of Engineering and Technology Innovation, vol. 5, no. 2, pp. 99–107, 2015.
3. P. G. Vicente et al., "Experimental investigation on heat transfer and frictional characteristics of spirally corrugated tubes in turbulent flow at different Prandtl numbers," International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 47, pp. 671–681, 2004.
4. V. D. Zimparov et al., "Heat transfer and friction characteristics of spirally corrugated tubes for power plant condensers – 1. Experimental investigation and performance evaluation," International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 34, no 9, pp. 2187–2197, 1990.
5. I. P. R. Nyarko, "Heat load and its effects on fluid friction factor in corrugated pipes," American journal of scientific and industrial research, vol. 3 (4), pp. 241–251, 2012.
6. O. Baskova et al., "Investigation of flow structure and heat exchange formation in corrugated pipes at transient Reynolds numbers," Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, vol. 3/8 (87), pp. 40-45, 2017.
7. L. G. Loytsyanskiy, "Mekhanika zhidkosti i gaza". Moskva: Gosudarstvennoye izdatel'stvo tekhniko-teoreticheskoy literatury, 1950, 680 s.
8. S. L. Rivkin i A. A. Aleksandrov, "Termodinamicheskiye svoystva vody i vodyanogo para". M.: Energoatomizdat, 1984. - 80 s. s il.

Надійшла 15.03.2018

Received 15.03.2018

ЕНЕРГЕТИЧНИЙ МЕНЕДЖМЕНТ ТА АУДИТ ENERGY MANAGEMENT AND AUDIT

УДК 699.86:658.26

А.А. Маліновський, д-р. техн. наук, проф., ORCID 0000-0001-9765-3494
В.Г. Турковський, канд. техн. наук, доц., ORCID 0000-0003-1869-8139
К.Б. Покровський, канд. техн. наук, доц., ORCID 0000-0003-4151-5820
А.З. Музичак, канд. техн. наук., ORCID 0000-0002-6330-1076
Національний університет «Львівська політехніка»

ПРОГРАМНА ТА АЛГОРИТМІЧНА ПІДТРИМКА ЕНЕРГЕТИЧНОГО АУДИТУ БУДІВЕЛЬ ТА ЇХ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ СЕРТИФІКАЦІЇ

Недостатня забезпеченість України власними енергоресурсами зумовлює актуальність потреби зменшення енергоспоживання, зокрема у житлово-комунальній сфері. Цьому повинні сприяти енергетичний аудит та енергетична паспортизація і сертифікація будівель згідно з чинною нормативною базою, яка в останні роки зазнала значних змін. Внесені зміни формують нові вимоги, яким повинне відповідати програмне забезпечення енергетичного менеджменту, та є основою для формування базових об'єктів програмного забезпечення, які надалі можна доповнювати іншими необхідними компонентами, що наведено у статті на прикладі опису цих об'єктів засобами UML. Також програмне забезпечення повинне містити підсистеми як нижнього рівня так і інформаційного забезпечення, які забезпечують спеціалізацію програмного пакету. Згідно описаної архітектури у Львівській політехніці було модернізовано програму «Енергоефективна будівля», що входить до складу спеціалізованого пакету. Ця програма дозволяє виконувати основні завдання виконання енергетичного аудиту будівель, обґрунтування системи енергоощадних заходів та розроблення енергетичного паспорту і енергетичного сертифікату будівлі.

Ключові слова: енергетичний сертифікат, енергетичний паспорт, енергетичний аудит, енергопотреба, програмне забезпечення.

Вступ

Енергетична безпека є одним із найважливіших пріоритетів розвитку будь-якої держави. Для України проблема енергетичної безпеки є тим більш актуальною, що вона належить до країн з недостатньою забезпеченістю власними енергоресурсами. Це зумовлює актуальність зменшення енергоспоживання та підвищення ефективності використання енергоресурсів, зокрема у сфері житлово-комунального господарства [1].

26 листопада 2014 року Уряд України схвалив плани заходів із імплементації директив ЄС у сфері енергоефективності, що входять до пакету зобов'язань, узятих Україною в рамках Європейського Енергетичного Співтовариства та Угоди про Асоціацію з ЄС, зокрема директиви 2010/31/ЄС Європейського Парламенту і Ради щодо енергетичної ефективності будівель [2].

Стимулювати зменшення енергоспоживання покликаний також Закон України «Про енергетичну ефективність будівель» [3], який набув чинності 23 липня 2017 року. Цим законом передбачено, зокрема, обов'язкову сертифікацію енергоефективності будівель державної власності. Низкою інших нормативних документів [4, 5, 6] передбачено складання енергетичного паспорта будівлі. Паспортизація дає визначення розрахункових показників для будівель і передбачає присвоєння будівлі відповідного класу енергетичної ефективності. Паспортизація є обов'язковою під час спорудження нових будівель та у випадку капітального ремонту і реконструкції будівель.

Підставою для складання енергетичного паспорту будівлі та її енергетичного сертифікату є проведення енергетичного аудиту, одним із результатів якого після аналізу зібраної інформації є оцінка актуального стану енерговитрат будівлі. Іншим важливим результатом енергетичного аудиту є виважений відбір пріоритетних енергоощадних заходів з обґрунтуванням кожного з них. Підґрунтям для проведення енергетичного аудиту є чинна законодавча та нормативна база України [7].

Зважаючи на великі обсяги вхідної інформації та значні обсяги обчислень, які слід виконувати у процесі енергетичного аудиту, одним із обов'язкових допоміжних засобів енергоаудитора, окрім різноманітної вимірювальної апаратури є відповідне сучасне програмне забезпечення.

Мета та завдання

У літературі можна знайти багато згадок про різноманітні програми, які виконують ті чи інші функції та автоматизують обчислення на різних стадіях енергетичного аудиту. Однак значні зміни, які з метою адаптації вітчизняної нормативної бази до міжнародної останніми роками було внесено в нормативну базу виконання енергетичного аудиту будівель, формують низку нових вимог до таких програмних продуктів.

Метою статті є опрацювання нових вимог, яким повинен відповідати програмний супровід енергетичного аудиту будівлі та формування системи базових об'єктів, що слід покласти в основу таких програм.

Матеріал і результати досліджень

Першою принциповою зміною є зміна підходу до визначення класу енергоефективності будівлі. Згідно ДБН В 2.6-31-2006 [9] його слід було визначати за питомими тепловитратами на опалення будівель, а згідно ДБН В 2.6-31-2016 [6] – за річною енергопотребою будівлі на опалення, охолодження та гаряче водопостачання. Останнє вимагає побудови енергетичного балансу будівлі, що неможливо без попереднього формування теплових балансів для опалювального та неопалювального сезонів.

Друга принципова зміна полягає у тому, що основним розрахунковим параметром є енергопотреба EP будівлі як для опалення так і для охолодження

$$EP = (Q_{H,nd} + Q_{C,nd} + Q_{DHW,nd}) / A \quad (1)$$

де $Q_{H,nd}$, $Q_{C,nd}$, $Q_{DHW,nd}$ – річна енергопотреба будівлі для опалення, охолодження, та гарячого водопостачання відповідно; A – кондиціонована (опалювана) площа для житлової будівлі чи кондиціонований об'єм для громадської будівлі.

Енергопотреби на опалення $Q_{H,nd}$ та на охолодження $Q_{C,nd}$ слід визначати за енергетичними балансами усіх зон будівлі

$$Q_{H,nd} = \sum_z Q_{H,nd,z}, \quad Q_{C,nd} = \sum_z Q_{C,nd,z}, \quad (2)$$

де $Q_{H,nd,z}$ – річна енергопотреба для опалення z -ої зони, $Q_{C,nd}$ – річна енергопотреба для охолодження z -ої зони.

Будівля розділяється на декілька зон за умови, щоб кожна зона обслуговувалась не більше ніж однією системою опалення та однією системою охолодження. Окрім цього для кожної зони повинна витримуватись умова неперевищення максимальної різниці температур 4 К. Межа зони будівлі складається з усіх елементів будівлі, що відокремлюють кондиціонований об'єм чи об'єми, які розглядають, від довкілля (повітря, ґрунт чи вода), від суміжних кондиціонованих зон, будівель чи некондиціонованих об'ємів тощо.

Ці зміни є основою для формування трьох базових об'єктів програмного забезпечення, а саме:

- будівля – інтегруючий об'єкт, навколо якого групуються усі інші об'єкти;
- зона будівлі – множина таких об'єктів лежить в основі математичної моделі теплового режиму будівлі в цілому,
- енергетичний баланс – базова одиниця, стосовно якої формуються усі результати роботи програми.

Далі кожен з базових об'єктів доповнюється іншими необхідними компонентами. Зокрема будівлю слід доповнити інформацією про її місце знаходження (кліматичні умови), системи енергозабезпечення (електропостачання, тепlopостачання, водопостачання тощо) та енергосистеми будівлі (опалення, освітлення, тощо). Кожна кондиціонована зона будівлі доповнюється компонентами (стіни, перекриття, вікна двері тощо), які формують її межі, та конструктивними особливостями цих компонентів. Енергетичний баланс складається на основі теплових балансів для опалювального та неопалювального періодів а також енергоспоживання решти устаткування протягом року.

Як на етапі створення програмного забезпечення, так і в процесі його експлуатації необхідною складовою його супроводу є засоби візуального конструювання структур даних. Таким ефективним засобом є метод графічного опису структури бази даних, що опирається на специфікацію UML [10]. Він дозволяє конструювати об'єктну архітектуру системи і відображати її на графічних схемах.

Покажемо це на прикладі опису базових об'єктів «Будівля», «Зона будівлі», «Енергетичний баланс» та «Система енергозабезпечення» засобами UML. Ієрархія цих об'єктів, з точки зору підсистеми варіантного аналізу наведена на рис. 1. Навколо базового об'єкту «Будівля» формується набір інших об'єктів та їх ієрархічних віток. Одну з віток становить ієрархія окремих зон, на які поділена будівля. Первинний клас «Зона будівлі» описує базові властивості кожної зони: тип (внутрішня чи зовнішня), якщо зона внутрішня, то неопалювана чи опалювана. Іншими основними характеристиками кожної зони є температура, вологість тощо. Далі кожна зона поєднана із масивом об'єктів «Огорожа», яка описує конструктивні особливості оболонки будівлі, такі як геометричні розміри окремих огорожувальних конструкцій, матеріал, опір теплопередачі тощо. Похідними від цього класу є такі класи як «Стіна», «Двері», «Вікно» тощо.

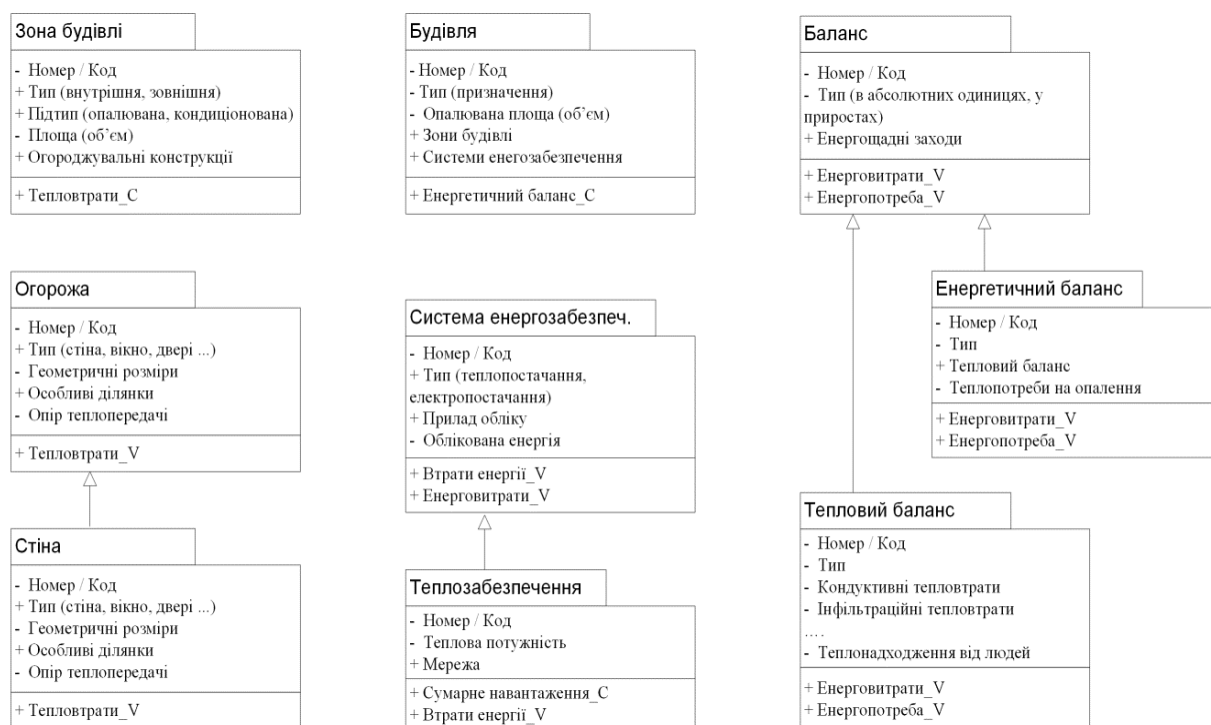


Рисунок 1 – Структурна схема опису основних об'єктів програми супроводу енергетичного аудиту будівлі

Ще одна вітка описує системи енергозабезпечення та їх обладнання (джерело тепла, теплові пункти, прилади опалення, електричний ввід, прилади освітлення, тощо), які є важливою складовою режиму енергозабезпечення/споживання будівлі. Об'єкт «Енергетичний баланс», який містить результати роботи програми, походить від базового об'єкту «Баланс», що містить початковий перелік властивостей спільних як для класу «Енергетичний баланс» так і для класу «Тепловий баланс».

Кожне поле у таблиці (рис. 1) може мати простий тип (позначене символом «-») чи бути посиланням на іншу таблицю (позначене символом «+»), де його властивості детально описані. Окрім цього властивості можуть бути обчислювальними (позначені суфіксом «_C») чи віртуальними (позначені суфіксом «_V»), що перекриваються в інших типах устаткування.

На підставі наведеної схеми (рис. 1) можна описати взаємозв'язки між об'єктами в поняттях схеми UML згідно властивостей об'єктного типу (рис. 2). У результаті в багатьох з об'єктів утворюється додатковий перелік властивостей типу «Перелік» (наприклад перелік зон, на які поділена будівля чи перелік огорожувальних конструкцій які є межею кожної зони).

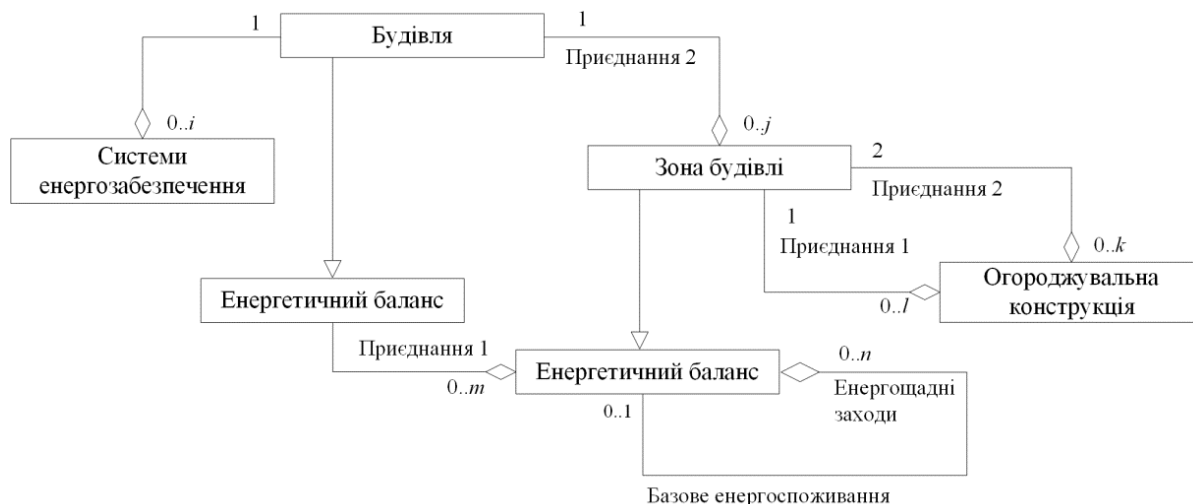


Рисунок 2 – Структурна схема опису основних об'єктів програми супроводу енергетичного аудиту будівлі

□ – успадкування властивостей, ◇ – перелік піделементів

Кожна будівля містить список підпорядкованих компонентів (0..j) типу «зона будівлі», яка поєднана із такими основними елементами як «огороджувальні конструкції» (0..l, 0..k) та «енергетичний баланс» (0..1), який визначається в абсолютних одиницях за базового енергоспоживання та в відносних одиницях для множини енергоощадних заходів (0..n). На підставі запропонованої технології роботи з даними надалі створюються програмні модулі з використанням алгоритмічних мов високого рівня.

Зауважимо також, що структурна схема сучасного програмного продукту повинна містити підсистеми як загального призначення нижнього рівня так і інформаційного забезпечення з різним функційним навантаженням, які забезпечують спеціалізацію програмного пакету (підсистеми варіантного аналізу).

Згідно описаної архітектури у Львівській політехніці було модернізовано програму «Енергоефективна будівля», що входить до складу спеціалізованого пакету [8] та розроблення якої було започатковано ще у 2004 р. Ця програма дозволяє виконувати такі основні завдання щодо паспортизації та сертифікації будівель:

- сформувані математичну модель теплового режиму будівлі з врахуванням теплоенергетичного впливу довкілля; скласти на її основі тепловий баланс будівлі для опалювального та неопалювального періодів року;

- сформувані розрахунковий енергетичний баланс будівлі з урахуванням реальних умов експлуатації будівлі, порівняти отриманий енергобаланс із фактичним енергоспоживанням за показами лічильників;

- сформувані базовий енергетичний баланс за дотримання нормативного температурного режиму в приміщеннях, нормативного повітрообміну та забезпечення необхідних обсягів споживання інших енергоресурсів впродовж року;

- скласти на основі математичної моделі теплового режиму будівлі та базового енергетичного балансу енергетичний паспорт будівлі та енергетичний сертифікат.

Додатково програма дозволяє виконувати завдання, що стосуються розроблення та обґрунтування енергоощадних заходів:

- визначити потенціал пропонованих енергоощадних заходів та виконати їхнє техніко-економічне обґрунтування;

- сформувані пакети енергетичних заходів за їхнім пріоритетом та послідовністю впровадження;

- сформувані енергетичний баланс будівлі після впровадження енергоощадних заходів та екологічну експертизу.

Кілька екранних фотографій, що демонструють можливості програми «Енергоефективної будівлі» наведено на рис. 3.

Енергоэффективная будівля - власна котельня

Проект Редагування Вигляд Загальні дані Відданих Аналіз Довідка Звітність

Будівля об'єкту
Будівель
Облік енергоспоживання

| №ч/п | Енергоощадний захід | К,тис.грн | В,тис.грн | Т,проект | Тек,років | Тд,о/Тд,п,проект | IRR,% | NPV,тис.грн | NPVQ |
|------|---------------------------------------|-----------|-----------|----------|-----------|------------------|-------|-------------|--------|
| 1 | утеплення стін | 899,15 | 149,7 | 6 | 30 | 8,5 / 9,5 | 16,5 | 1269,35 | 1,412 |
| 2 | утеплення даху | 227,66 | 30,93 | 7,4 | 30 | 10,7 / 12,6 | 13,3 | 220,38 | 0,968 |
| 3 | утеплення фундаменту | 77,82 | 10,73 | 7,3 | 30 | 10,5 / 12,3 | 13,5 | 77,63 | 0,997 |
| 4 | заміна вікон і балконних дверей | 634,5 | 46,76 | 13,6 | 25 | 26,8 / 35 | 5,4 | -9,13 | -0,014 |
| 5 | встановлення доводжувачів вікна | 1,4 | 1,02 | 1,4 | 5 | 2,5 / 2,5 | 67,2 | 2,95 | 2,105 |
| 6 | встановлення захарактеристики екранів | 5,4 | 5,23 | 1 | 6 | 2,1 / 2,1 | 95 | 20,68 | 3,83 |
| | | | | 0 | 0 | 0 / 0 | 0 | 0,0 | 0,0 |
| | | | | 6,2 | 25 | 8,9 / 10 | 15,6 | 1199,78 | 1,143 |

Формування переліку температурних зон

Тип температурної зони: внутрішня

| Код зони | Назва темп. зони | Примітка | та, °C | тб, °C | тв, °C |
|----------|------------------|----------|-----------|-----------|-----------|
| Зона_1 | кімнати | | 18,1/16,0 | 21,0/18,0 | 21,0/18,0 |
| Зона_2 | коридори | | 16,5/15,5 | 18,0/16,0 | 18,0/16,0 |
| Зона_3 | забатарейні | | 33,0/31,0 | 35,0/33,0 | 25,0/23,0 |

Огорожі Паспортні дані Теплова потужність Теплоізотермія Тепло-та енергобаланси Енергоощадні заходи

| Тепловий баланс за опалювальний сезон, МВт·год | | | | |
|--|------------|-----------|---------|-----------|
| Витрати теплової енергії за опалювальний сезон | розрахунок | лічильник | базовий | після ТМБ |
| на потреби опалення | 199,67 | 199,27 | 242,06 | 123,22 |
| на потреби інфільтрації | 35,25 | | 43,66 | 36,68 |
| теплонакопичення від ГВП | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| теплонакопичення від людей | 22,29 | | 22,29 | 22,29 |
| сонячні теплонакопичення | 5,97 | | 5,97 | 5,97 |
| теплонакопичення від джерел освітлення, Рпоб | 0,59 | 0,0 | 0,59 | 0,59 |
| теплонакопичення від інших електроприладів, Рпоб | 14,55 | 15,39 | 14,55 | 14,55 |
| теплотребов від СО | 191,5 | 183,87 | 242,31 | 116,5 |
| | | | | |
| | | | | |
| Енергетичний баланс за рік, МВт·год | | | | |
| Складові енергетичного балансу | розрахунок | лічильник | базовий | після ТМБ |
| опалення | 191,5 | 183,87 | 242,31 | 116,5 |
| окопичення | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |

Рисунок 3 – Екранні фотографії, що демонструють можливості програми «Енергоэффективной будівлі»

Розроблена програма відповідає вимогам чинної вітчизняної нормативної бази та є ефективним засобом виконання енергетичного аудиту будівель. Програму було верифіковано під час проведення енергетичного аудиту низки адміністративних будівель.

Висновки

Актуалізація нормативної бази України у сфері енергоспоживання, енергозаощадження та енергетичного аудиту зумовила появу низки нових вимог, яким повинні відповідати програмні інструменти супроводу енергетичного аудиту у житловій та адміністративній сфері.

Сформовано засади яким повинні відповідати програмні інструменти супроводу енергетичного аудиту будівель. Відповідно до цих засад сформовано базовий набір об'єктів, які лежать в основі програмного продукту.

Розроблено програмний продукт, що відповідає новим вимогам чинної нормативної бази щодо виконання енергетичного аудиту будівель та їх енергетичної сертифікації.

Список використаних джерел

1. Маліновський А.А., Турковський В.Г., Музичак А.З. Децентралізоване тепlopостачання – альтернатива чи хибний шлях // Проблеми загальної енергетики. Науковий збірник Інституту загальної енергетики Національної академії наук України. – 2011. – №4(27). – С.53-56.
2. Directive 2010/31/EU of the European parliament and of the council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings.
3. Закон України від 22 червня 2017 року № 2118-VIII «Про енергетичну ефективність будівель».
4. ДСТУ-Н Б А.2.2-13:2015 Енергетична ефективність будівель. Настанова з проведення енергетичної оцінки будівель – [Чинний від 01-01-2016] – К.: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2015. – 72 с.
5. ДСТУ Б А.2.2-12:2015 Енергетична ефективність будівель. Метод розрахунку енергоспоживання при опаленні, охолодженні, вентиляції, освітленні та гарячому водопостачанні. – [Чинний від 01-01-2016] – К.: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2015. – 202 с.
6. ДБН В.2.6-31:2016. Конструкції будинків і споруд. Теплова ізоляція будівель – [Чинний від 01-04-2017] – К.: Міністерство будівництва, архітектури та житлово-комунального господарства України, 2016. – 33 с.

7. ДСТУ Б В.2.2-39:2016 Методи та етапи проведення енергетичного аудиту будівель – [Чинний від 01-01-2017] – К.: ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій», 2016. – 72 с.
8. Komputerowe wspomaganie audytu energetycznego miejskich systemów ciepłowniczych / A. Malinowski [etc] // IX Międzynarodowe seminarium naukowo-techniczne «Energodom 2008», 2008 – P.321-329.
9. ДБН В.2.6-31:2006. Конструкції будинків і споруд. Теплова ізоляція будівель – [Не чинний] – К.: Міністерство будівництва, архітектури та житлово-комунального господарства України, 2006. – 72 с.
10. Object Management Group, 2003. OMG Unified Modeling Language Specification – Режим доступу до вид.: <http://www.omg.org> – Назва з екрану.

УДК 699.86:658.26

А.А. Малиновский, д-р техн. наук, проф., **ORCID** 0000-0001-9765-3494
В.Г. Турковский, канд. техн. наук, доц., **ORCID** 0000-0003-1869-8139
К.Б. Покровский, канд. техн. наук, доц., **ORCID** 0000-0003-4151-5820
А.З. Музычак, канд. техн. наук., **ORCID** 0000-0002-6330-1076
Национальный университет «Львовская политехника»,

ПРОГРАММНАЯ И АЛГОРИТМИЧЕСКАЯ ПОДДЕРЖКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО АУДИТА ЗДАНИЙ И ИХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СЕРТИФИКАЦИИ

Недостаточная обеспеченность Украины собственными энергоресурсами обуславливает актуальность потребности уменьшения энергопотребления, в частности в жилищно-коммунальной сфере. Этому должны способствовать энергетический аудит и энергетическая паспортизация и сертификация зданий в соответствии с действующей нормативной базой, которая в последние годы претерпела значительные изменения. Внесенные изменения формируют новые требования, которым должно отвечать программное обеспечение энергетического менеджмента, и являются основой для формирования базовых объектов программного обеспечения, которые в дальнейшем можно дополнять другими необходимыми компонентами, что приведено в статье на примере описания этих объектов средствами UML. Также программное обеспечение должно содержать подсистемы как нижнего уровня так и информационного, обеспечивающих специализацию программного пакета. Согласно описанной архитектуры во Львовской политехнике модернизировано программу «Энергоэффективное здание», входящую в состав специализированного пакета. Эта программа позволяет выполнять основные задачи выполнения энергетического аудита зданий, обоснование системы энергосберегающих мероприятий и разработку энергетического паспорта и энергетического сертификата здания.

Ключевые слова: энергетический сертификат, энергетический паспорт, энергетический аудит, энергопотребность, программное обеспечение.

A. Malinowski, Doct. Eng. Sc., Prof., **ORCID** 0000-0001-9765-3494
V. Turkovski, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., **ORCID** 0000-0003-1869-8139
K. Pokrovskiy, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., **ORCID** 0000-0003-4151-5820
A. Muzychak, Cand. Sc. (Eng.), **ORCID** 0000-0002-6330-1076
Lviv Polytechnic National University,

SOFTWARE AND ALGORITHMIC SUPPORT FOR ENERGY AUDIT OF BUILDINGS AND FOR THEIR ENERGY CERTIFICATION

The insufficient supply of Ukraine with its own energy resources determines the topicality of the reduction of energy consumption, in particular in the housing and communal sector. The important means, which are supposed to promote energy efficiency increasing, are energy passport and energy certificate. Their development requires an energy audit. The basis for carrying out the energy audit and drawing up an energy passport and an energy certificate is the current regulatory framework, which has undergone significant changes in recent years in order to adapt it to international regulatory framework. The changes form new requirements which the software

of energy management should correspond to. The most significant changes are the transition to the estimation of energy efficiency of the building from the specific heat consumption for heating to the annual energy demand for heating, cooling and heat water supply and the need to calculate the energy demand according to the energy balances of all building zones. The changes are the basis for the formation of basic software objects such as building, building zone and energy balance. Next each basic object can be supplemented by other necessary components. This is illustrated in the article on an example of describing the several objects by UML-tools. It allows us to describe the relationships among objects in concepts of UML-scheme according to the properties of an object type. According to the capabilities of modern software the structure scheme of each application should contain subsystems as application software as information provision. The structure of such a structural-functional scheme includes both general-purpose subsystems of the lower level, as well as applications that provide the specialization of the software. According to the described structure the program "Energy efficient building", which is part of the specialized package, is modernized in Lviv Polytechnic. The program allows performing the main tasks such as performance of energy audit of building, substantiation of system of energy-saving measures and drawing up of energy passport and energy certificate of building.

Key words: *energy certificate, energy passport, energy audit, energy demand, software.*

1. Malinowski A., Turkowski V., Muzychak A. (2011) "Decentralized heat supply is an alternative or a false path", Scientific collection of the Institute of General Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine "Problems of general energy", no. 4(27), p.53-56, (Ukr).

2. Directive 2010/31/EU of the European parliament and of the council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings.

3. About energy efficient of buildings: Law of Ukraine, 22.06.2017, № 2118-VIII.

4. The energy efficiency of buildings. Guide of the energy assessment of buildings: DSTU N B A.2.2-13:2015. – [Valid from 01.01.2016] // Ministry of construction, architecture and housing and communal services of Ukraine. – Kyiv, 2011. –72 p. – (State Standards of Ukraine), (Ukr).

5. The energy efficiency of buildings. The method of calculating the energy consumption for heating, cooling, ventilation, lighting and hot water supply: DSTU B A.2.2-12:2015. – [Valid from 01.01.2016] // Ministry of construction, architecture and housing and communal services of Ukraine. – Kyiv, 2015. – 202 p. – (State Standards of Ukraine), (Ukr).

6. Construction of buildings and facilities. Thermal insulation of buildings: DBN V.2.6-31:2016. – [Valid from 01.04.2017] // Ministry of construction, architecture and housing and communal services of Ukraine. – Kyiv, 2016. – 33 p. – (State Building Standards of Ukraine), (Ukr).

7. Methods and stages of the energy audit of buildings: DSTU B V.2.2-39:2016. – [Valid from 01.01.2017] // Ministry of construction, architecture and housing and communal services of Ukraine. – Kyiv, 2016. – 72 p. – (State Standards of Ukraine), (Ukr).

8. Komputerowe wspomaganie audytingu energetycznego miejskich systemów ciepłowniczych / A. Malinowski [etc] // IX Międzynarodowe seminarium naukowo-techniczne «Energodom 2008», 2008 – P.321-329. (Pol).

9. Construction of buildings and facilities. Thermal insulation of buildings: DBN V.2.6-31:2006. – [Not valid] // Ministry of construction, architecture and housing and communal services of Ukraine. – Kyiv, 2006. – 72 p. – (State Building Standards of Ukraine), (Ukr).

10. Object Management Group, 2003. OMG Unified Modeling Language Specification – Режим доступу до вид.: <http://www.omg.org> – Назва з екрану.

Надійшла 17.04.2018

Received 17.04.2018

В.П. Розен, д-р техн. наук, проф., ORCID 0000-0002-0440-4251
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Л.В. Давиденко, канд. техн. наук, доц., ORCID 0000-0002-0176-2045
Луцький національний технічний університет
Н.В. Давиденко, асистент, ORCID 0000-0002-9722-745X
Національний університет водного господарства та природокористування

УРАХУВАННЯ ЦИКЛІЧНИХ ЗМІН ПРОЦЕСУ ВОДОПОДАЧІ ПІД ЧАС КОНТРОЛЮ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ НАСОСНИХ СТАНЦІЙ

Розглянуто питання удосконалення контролю ефективності електроспоживання об'єктів водопостачання шляхом урахування впливу циклічних змін зовнішнього середовища. Обґрунтовано взаємозв'язок ефективності електроспоживання та водоспоживання, на яке впливають сезонні та соціальні чинники. Запропоновано процедуру виявлення циклічних змін процесу водоподачі, яка передбачає пошук подібності у добових графіках витрати води з мережі водопостачання та формування груп однотипних графіків за допомогою методів кластерного та дискримінантного аналізу. Її реалізація дозволяє визначити часовий період для збору даних щодо визначальних змінних, а також здійснити формалізований опис режиму водоподачі для планування технологічних параметрів та визначення базового рівня енергоспоживання. Для забезпечення коректного контролю ефективності електроспоживання запропоновано процедуру розпізнавання приналежності добових графіків витрати води до одного з типових класів. Використання запропонованих процедур дозволяє враховувати зміну фактичних умов функціонування насосних станцій, зумовлену впливом сезонних та соціальних чинників.

Ключові слова: ефективність електроспоживання, контроль електроспоживання, базовий рівень електроспоживання, насосна станція водопостачання.

Вступ. Основним принципом під час формування змісту функції управління енергоспоживання є логічно послідовна інтегрована замкнутість її базових функцій [1]: вимірювання та облік; унормування та планування; контроль та аналіз; керування. Розробка керуючих впливів на об'єкт з метою коригування його функціонування для підвищення рівня енергоефективності здійснюється за результатами контролю. В основу контролю покладено зіставлення результатів вимірювань із завданням - запланованими показниками, базовим рівнем енергоспоживання (БРЕ) [2]. БРЕ повинен бути унормованим до змінних, що впливають на енергоспоживання; часовий період БРЕ повинен бути типовим для коливань в організаційних операціях; а дані щодо визначальних змінних та фактичного енергоспоживання повинні представляти той самий часовий період, що й БРЕ [3]. Тобто, проблема управління енергоспоживанням будь-якого виробничого об'єкту, в тому числі, об'єктів водопостачання, має цілісний характер і вимагає урахування як явних, так і прихованих причинно-наслідкових зв'язків.

Система комунального водопостачання (СКВ) під час експлуатації піддається впливу багатьох чинників. Формування режиму електроспоживання здійснюється під впливом внутрішніх та зовнішніх факторів, які потребують урахування під час визначення БРЕ та організації контролю ефективності електроспоживання об'єктів водопостачання. Одним з таких чинників є водоспоживання, що визначає витрату води з мережі, а отже ефективність режиму водоподачі та разом з технічними та технологічними чинниками – ефективність електроспоживання. Саме водоспоживання є зовнішнім чинником, який ускладнює оцінку ефективності роботи насосних станцій (НС) водоподачі та споживання електроенергії. Крім того, зміна об'ємів витрати води з мережі зумовлює зміну режиму роботи насосних агрегатів НС, значень технологічних параметрів та часових періодів для їх отримання. Отже, обов'язковим елементом під час організації контролю є урахування випадкових впливів та чинників зовнішнього середовища.

Мета статті. Удосконалення контролю ефективності електроспоживання об'єктів водопостачання шляхом розробки принципів урахування циклічних змін технологічного процесу водоподачі, зумовленого впливом чинників зовнішнього середовища.

Основні матеріали дослідження. Забезпечення ефективного електроспоживання вимагає оптимізації режиму електроспоживання об'єктів водопостачання, а також оптимізації технологічного процесу водоподачі. Для забезпечення ефективного режиму водопостачання водоподача повинна максимально відповідати водоспоживанню. Але водоспоживання – випадковий процес.

На нього впливають кліматичні (залежність водоспоживання від погодних явищ: температура повітря, опади) та соціальні чинники (залежність водоспоживання від соціального укладу життєдіяльності: типу дня - робочий, вихідний, святковий; час доби). Зовнішнє середовище представляє собою сукупність факторів прямої та непрямої дії, які потребують врахування під час планування добової водоподачі та визначають організацію технологічного процесу водопостачання, а отже мають безпосередній вплив на ефективність режиму електроспоживання (рис. 1). Не врахування впливу чинників зовнішнього середовища зумовлює зниження ефективності організації режиму водоподачі, а значить споживання електроенергії.

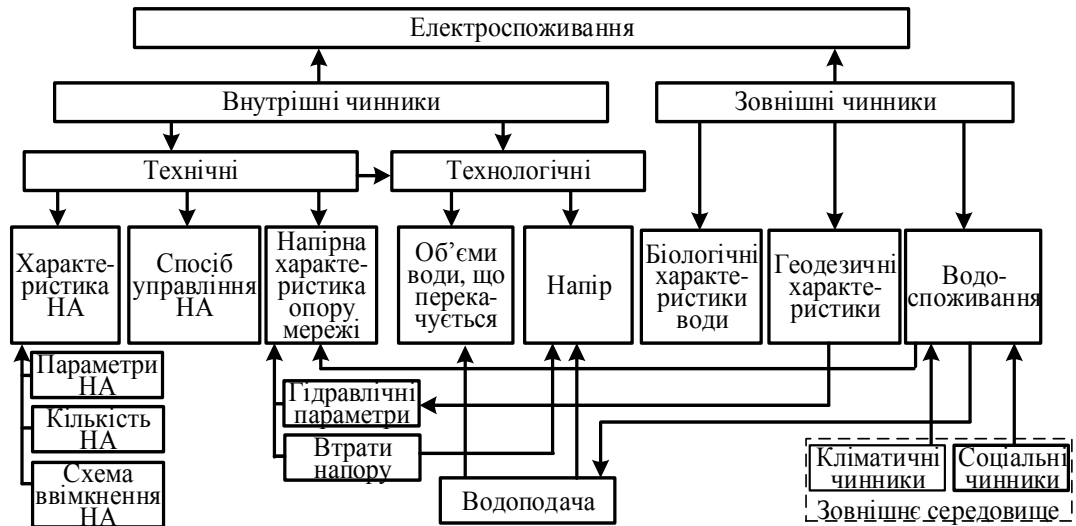


Рисунок 1 – Взаємозв'язок електроспоживання об'єктів водопостачання та внутрішніх і зовнішніх чинників

Основним режимним показником процесу водопостачання є добовий графік витрати води (ГВВ) з мережі. Зміни водоспоживання в часі відображають циклічність щоденного способу життя: робочий час, час відпочинку. Добові ГВВ відрізняються один від одного за порами року (рис. 2). Аналіз ГВВ дозволяє стверджувати: витрата води є нерівномірною не лише протягом доби, але й відрізняється залежно від дня тижня. Спостерігається добова циклічність, циклічність протягом тижня і річна повторюваність графіків.

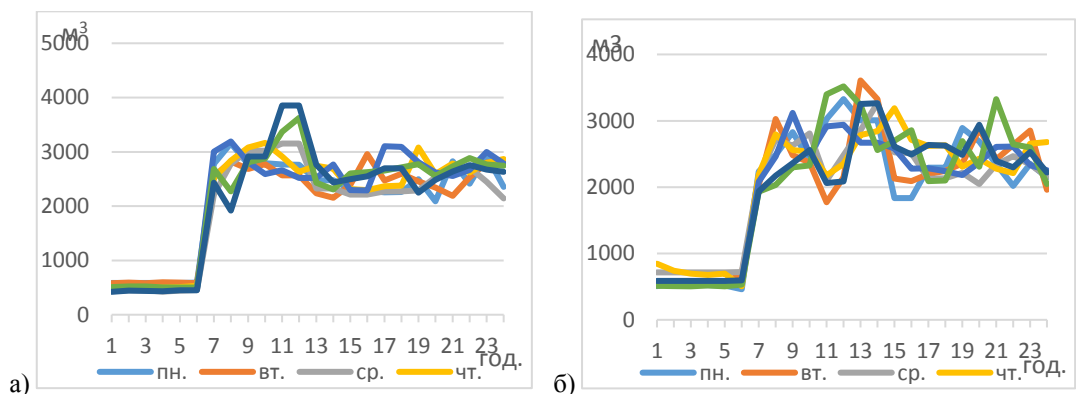


Рисунок 2 - Добові графіки витрати води з мережі водопостачання: а) – червень; б) грудень

Одним з завдань системи контролю енергоефективності є планування електроспоживання (визначення БРЕ), а також встановлення нормативів для контрольованих технологічних параметрів та показників енергоефективності. Для здійснення коректного контролю ефективності електроспоживання часовий період дії БРЕ повинен відображати циклічні зміни технологічного процесу [3]. Для врахування реальних умов функціонування об'єкту контролю та уникнення завищення (заниження) нормативів їх доцільно встановлювати на базі накопиченої статистики про обсяги споживання електроенергії, показники енергоефективності та технологічні параметри процесу водопостачання. Тобто, передумовою процедури моделювання електроспоживання та визначення БРЕ є отримання інформації щодо електроспоживання та технологічних параметрів режиму роботи НС для створення інформаційної бази даних (БД) та статистичний аналіз отриманих даних.

Впровадження системи моніторингу забезпечує можливість створення великих баз даних, що містять інформацію про режими роботи об'єктів СКВ та їх електроспоживання, інтелектуальний аналіз якої забезпечує можливість поетапного вирішення низки задач, що передують формуванню БРЕ, унормованого до визначальних змінних для репрезентативних часових інтервалів, зокрема:

- аналіз режимів водоспоживання та виявлення тенденцій його зміни залежно від сезону, соціальних чинників тощо;
- опис режиму водоподачі з урахуванням виявлених тенденцій;
- побудова математичної моделі електроспоживання, адаптованої до збурюючих впливів [4].

На першому етапі аналізу слід ідентифікувати ключові фактори впливу чинників зовнішнього середовища та виконати їх формалізацію.

На основі створеної БД можливе дослідження ГВВ для пошуку їх подібності з урахуванням впливу зовнішніх чинників, що визначають процес водоспоживання. Задача може бути розв'язана шляхом формування класів ГВВ, що мають однакові властивості, з використанням теорії розпізнавання образів. Об'єктами класифікації є добові ГВВ, ознаками - параметри добового ГВВ [5]. Кластер - група ГВВ з подібними рисами. Системи автоматизованого управління та системи моніторингу дозволяють накопичити достатній об'єм адекватного статистичного матеріалу для виконання такого розбиття.

Зважаючи на відсутність інформації щодо можливих класів на початковому етапі доцільним є використання процедур розпізнавання образів «без учителя» (автоматичної класифікації), зокрема, кластерного аналізу (КА). Доцільність використання КА для аналізу ГВВ пояснюється тим, що він дозволяє розглядати великий об'єм даних і будувати науково обґрунтовані класифікації, виявляючи внутрішні зв'язки між одиницями спостереженої сукупності, а отже виявити раніше невідомі закономірності і представити їх у зручній формі. КА не потребує апріорних припущень про набір даних, не накладає обмежень на вигляд об'єктів класифікації, дозволяє аналізувати показники різних типів даних. Класифікація будується у багатовимірному ознаковому просторі шляхом багатокрокового об'єднання об'єктів в кластери з урахуванням принципу найбільшої подібності в групах і найбільшої різниці між групами [6]. Результатом кластеризації є розбиття об'єктів на групи, що задовольняють деякому критерію оптимальності [7].

Таким чином, використання методів КА дозволить виявити приховані закономірності та виділити групи однотипних ГВВ за рівнем впливу зовнішніх чинників. Однак КА не дає ні правил, ні чітких критеріїв оцінки якості класифікації, тому результати класифікації можуть бути неоднозначними.

Наступний крок – формування правил для розпізнавання належності добового ГВВ до одного з кластерів та перевірка якості отриманих результатів кластеризації. Для цього є доцільним використання дискримінантного аналізу (ДА) - одного з методів розпізнавання образів «із учителем», який дає можливість класифікувати (прогнозувати імовірність належності до класу) нові об'єкти й події на основі "навчання" за емпіричними даними (навчальними вибірками). При цьому передбачається, що вихідні дані поряд з ознаками об'єктів містять групуючу змінну, яка визначає приналежність об'єкта до певної групи.

Мета ДА полягає в тому, щоб на основі вимірювання різних ознак об'єкта віднести його до однієї з декількох заданих груп (класифікувати) деяким оптимальним способом, під яким розуміється або мінімум математичного сподівання втрат, або мінімум ймовірності помилкової класифікації [8]. Суть ДА полягає у визначенні правил, яке дає змогу відрізнити один клас об'єктів від інших, тобто провести розпізнавання належності об'єкта до класу. Зазвичай в завданні розрізнення переходять від вектора ознак, що характеризують об'єкт, до лінійної функції від них - дискримінантної функції (ДФ), яка інтерпритується як гіперплощина, що найкраще розділяє сукупність вибірових точок [7, 8].

Метод ДА дає змогу визначити кількісні змінні, значення яких істотно відрізняються для різних рівнів групуючої змінної, та оцінити можливість індикації належності до класів. Якщо зв'язок є суттєвим, можна отримати правило, за яким знаходять імовірність належності об'єкту до класу за значеннями індикаторних змінних. Крім того, передбачено перевірку несуперечності класифікації, проведеної на вихідних емпіричних даних.

Застосування ДА забезпечує можливість інтерпретації міжгрупових відмінностей, що враховує багатовимірність досліджуваного явища (визначення способу дискримінації наявних груп); пошуку найбільш інформативних змінних (змінних, які найкраще відрізняють (дискримінують) об'єкти, що належать до різних груп); класифікації спостережень у різні групи (прогнозування імовірності належності до класу); перевірку якості (результатів) кластеризації.

З вищевказаного слідує, процедура виявлення подібності у добових ГВВ містить два етапи та полягає у вирішенні низки завдань шляхом послідовного використання методів КА та ДА (рис. 3).

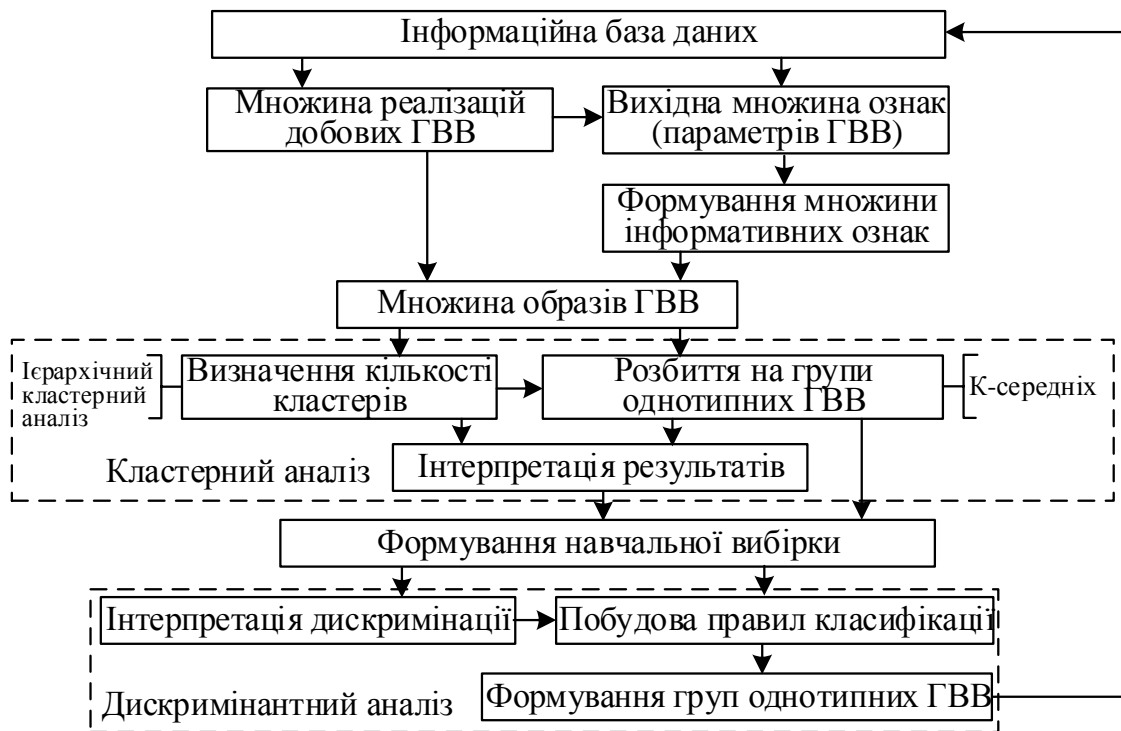


Рисунок 3 – Послідовність використання процедур КА та ДА для класифікації ГВВ

Таким чином, використання методів КА забезпечить можливість виявлення прихованих закономірностей у добових ГВВ та їх розбиття на групи, тобто формування навчальної вибірки. Це дасть змогу застосувати ДА для уточнення класифікації та розподілу ГВВ між типовими класами. Результатом такого розподілу є формування груп однотипних ГВВ.

Формування груп однотипних ГВВ забезпечує можливість не лише виявлення циклічних змін технологічного процесу водоподачі та встановлення часових проміжків для визначення БРЕ, а й формування статистичних вибірок даних щодо електроспоживання, технологічних параметрів для кожного типового дня кожного сезону. Аналіз отриманих вибірок щодо витрат води з мережі водопостачання дозволяє виконати формалізований опис режиму водоподачі [4]: формування усереднених характеристик витрати води з мережі залежно від сезону, профілю її добового графіка для типового дня та визначення його параметрів, а також ПЕЕ, які відображають енергоефективність технічного стану об'єкту та організації технологічного процесу водоподачі, запланованого з урахуванням профілю ГВВ. Результати такого опису виступатимуть основою для планування визначальних змінних з метою їх використання для подальшого моделювання електроспоживання, а також встановлення контрольних меж визначальних змінних для організації процедури контролю технологічних параметрів.

Формалізований опис режиму водоподачі для типового дня кожного сезону забезпечує формування нормативів для визначальних змінних, зокрема: середніх значень для кожної змінної, а також допустимих меж їх зміни, встановлених як довірчий інтервал для вибіркового математичного сподівання нормально розподіленої величини з довірчою імовірністю $p=0,997$. Середні значення визначальних змінних слід приймати як планові для визначення БРЕ, що характеризуватиме рівень досяжної енергоефективності. Встановлені межі зміни визначальних змінних використовуються як граничні контрольні для аналізу відповідності технологічного процесу водоподачі запланованому та правильності вибору моделі електроспоживання для побудови БРЕ.

Для забезпечення коректного контролю ефективності електроспоживання необхідно передбачити перевірку відповідності фактичного ГВВ запланованому ГВВ, з урахуванням якого здійснювалось планування режиму водоподачі та планування електроспоживання.

Використання ДА забезпечує можливість побудови функцій класифікації, які використовуються для класифікації ГВВ. Класифікаційні функції забезпечують можливість розпізнавання приналежності нових спостережень ГВВ до одного з типових класів (рис. 4).

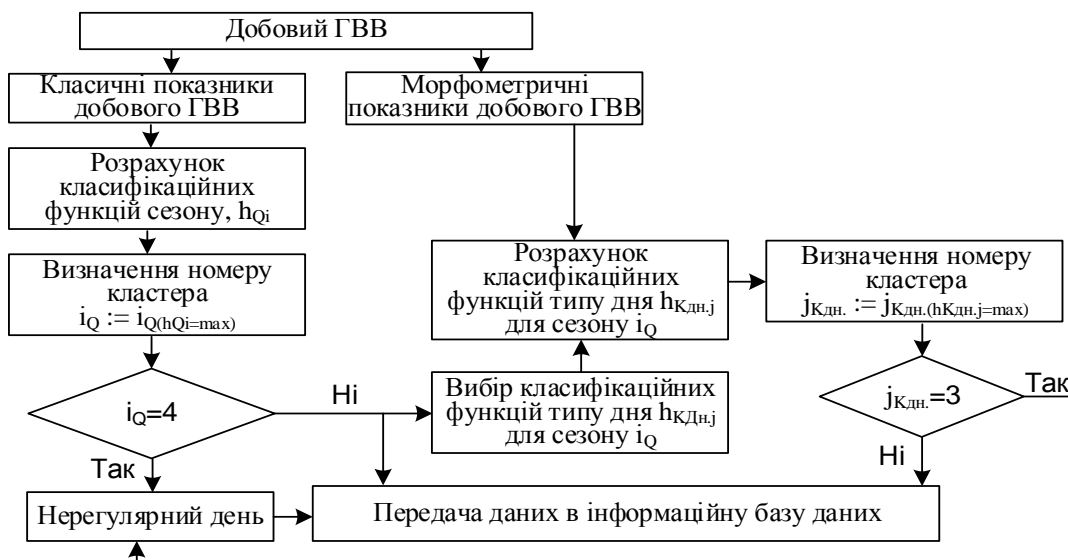


Рисунок 4 – Алгоритм ідентифікації належності ГВВ до типових кластерів

Процедура ідентифікації здійснюється у два етапи: спочатку перевіряється належність ГВВ до відповідного кластеру за сезоном; за умови не відповідності ГВВ класу нерегулярних днів здійснюється процедура ідентифікації належності ГВВ до одного з класів за типом дня.

Кількість кластерів прийнято: для першого етапу 4: 1 клас – «літо» – ГВВ, що відповідають періоду профілактичних робіт у системі тепло- та гарячого водопостачання; 2 клас – «зима» – ГВВ, що відповідають опалювальному періоду; 3 клас – «весна-літо-осінь» – ГВВ, що відповідають весняно-літньо-осінньому періоду; 4 клас – «нерегулярні дні» – ГВВ різних місяців та сезонів, для другого – 3: 1 клас – «робочі дні» - ГВВ, що відповідають робочим дням; 2 клас – «вихідні дні» - ГВВ, що відповідають вихідним та святковим дням; 3 клас – «нерегулярні дні» - ГВВ днів різного типу [4].

Перевірка умови не належності ГВВ до класу нерегулярних днів зумовлена необхідністю коректного формування БРЕ та подальшого контролю електроспоживання. У випадку встановлення факту належності ГВВ до класу нерегулярних днів проведення процедури контролю є недоречним.

Висновки. Одним із чинників, що визначає витрату води з мережі водопостачання, а отже ефективність режиму водоподачі та електроспоживання, є водоспоживання, яке має випадковий характер та формується під впливом кліматичних та соціальних чинників. Впровадження системи моніторингу забезпечує можливість створення великих баз даних, що містять інформацію про об'єми добової витрати води з мережі, та урахування випадкового характеру водоспоживання як збурюючого зовнішнього чинника під час контролю ефективності електроспоживання. Послідовне використання процедур кластерного та дискримінантного аналізу дозволяє виявити приховані закономірності у ГВВ, зумовлені сезонними змінами та змінами ритму життя населення у робочі та вихідні дні, та сформувати групи однотипних графіків. Результати такого розбиття не лише забезпечують можливість визначення часового періоду для збору даних щодо визначальних чинників і фактичного електроспоживання, а й дають змогу виконати формалізований опис режиму водоподачі з урахуванням виявлених тенденцій та визначити базовий рівень енергоефективності для конкретного часового проміжку, що є основою коректного контролю ефективності електроспоживання. Використання запропонованої процедури розпізнавання приналежності ГВВ до одного з типових класів дозволяє врахувати фактичні умови роботи насосної станції під час планування електроспоживання та контролю його ефективності.

Список використаної літератури

1. Праховник А.В., Соловей А.И. и др. Энергетический менеджмент. Київ: ІЕЕ НТУУ «КПІ», 2001. 472 с.
2. Півняк Г.Г., Випанасенко С.У., Хованська О.І. та ін. Системи енергоменеджменту та їх математичне забезпечення. Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2013. 214 с.
3. ДСТУ ISO 50004:2016 (ISO 50004: 2014, IDT) Настанова щодо впровадження, супровід та поліпшення системи енергетичного менеджменту. Київ, 2016. 38 с.

4. Розен В.П., Давиденко Л.В., Давиденко Н.В. Процедура побудови базового рівня електроспоживання об'єктів водопостачання з урахуванням впливу зовнішніх чинників. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2017. №3 (49). С. 31-37.

5. Розен В.П., Давиденко Н.В. Формування множини характеристик фактичного режиму водоспоживання в системах комунального водопостачання. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2015. № 3 (41). С. 85-92.

6. Пістунів І.М., Антонюк О.П. Кластерний аналіз в економіці. Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2008. 84 с.

7. Дубров А.М., Мхитарян В.С., Трошин Л.И. Многомерные статистические методы. Москва: Финансы и статистика, 2003. 352 с.

8. Халафян А.А. STATISTICA. Статистический анализ данных. Москва: Бинوم-Пресс, 2007. 512 с.

V. Rozen, Dr. Eng. Sc., Prof., ORCID 0000-0002-0440-4251
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
L. Davydenko, Cand. Eng. Sc., Assoc. Prof., ORCID 0000-0002-0176-2045
Lutsk National Technical University
N. Davydenko, Assist, ORCID 0000-0002-9722-745X
National University of Water and Environmental Engineering

TAKING INTO CONSIDERATION OF CYCLIC CHANGES IN THE WATER SUPPLY PROCESS DURING CONTROL OF THE POWER CONSUMPTION EFFICIENCY OF PUMPING STATIONS

The article deals with the issues of improvement the power consumption efficiency control of municipal water supply systems objects by taking into consideration the influence of external environment cyclic changes. The interconnection of the power consumption efficiency of pumping stations and water consumption, which is influenced by climatic and social factors, has been substantiated. A set of tasks preceding the formation of the energy baseline to ensure the correct control of the power consumption efficiency has been formulated.

The procedure of cyclic changes detection of the water supply process has been proposed. It involves search of similarities in the daily graphs of water consumption from the water supply network. The expediency of successive use for such search of methods of cluster and discriminant analysis has been substantiated. The procedure result is the formation of groups of the same type graphs. Its implementation allows determining the time period for collecting data on the relevant variables and performing a formalized description of the pumping station water supply mode, in particular, determining the mean values of the relevant variables and their change limits. These results are the basis of the formation of technological parameters norms for controlling the conformity of the water supply technological process to the previously planned. The mean values have been proposed to be used as planned values of the relevant variables for determining the energy baseline.

In order to ensure the correct control of the power consumption efficiency, the implement recognition procedure of the water supply daily graphs to one of the typical classes has been proposed. The classification functions built on the final stage of discriminant analysis is its basis. Identification of the appliance of the graph to the typical groups is carried out first by season, and then by day type. The fact of implement of the graph to irregular days is fixed. The use of the proposed procedures allows taking into consideration the change in the actual conditions of the pumping stations functioning, due to seasonal changes and changes in the life rhythm of the population at workdays and weekends.

Keywords: power consumption efficiency, power consumption control, energy baseline, water supply pumping station.

References

1. A.V. Prakhovnik, Solovey A. I. et al., *Energeticheskij menedzhment*. Kyiv: IEE NTUU "KPI", 2001.
2. G. G.Pivniak, S. U. Vypanasenko, O. I. Khovanska et al., *Systemy enerhomenedzhmentu ta yich matematychny zabezpechennia*. Dnipropetrovsk, natsionalnyi Hirnychyi Universytet, 2013.
3. DSTU ISO 50004:2016 (ISO 50004: 2014, IDT) Nastanova shchodo vprovadzhennia, suprovid ta polipshennia systemy enerhetychnoho menedzhmentu. Kyiv, 2016.
4. V. P. Rozen, L. V. Davydenko, and N. V. Davydenko, «Procedure of construction the energy baseline of water supply facilities with taking into consideration the external factors influence», *Power engineering: economics, technologies, ecology*, no. 3 (49), pp. 31-37, 2017.

5. V. P. Rozen, and N. V. Davydenko, «Formation of the characteristics set of the actual regime of water consumption in public water supply systems», *Power engineering: economics, technologies, ecology*, no. 3, pp. 85-92, 2015.
6. I. M. Pistunov, *Clusternyi analiz v ekonomitsi*. Dnipropetrovsk, National Mining University, 2008.
7. A. M. Dubrov, V. S. Mkhitarian, and L. I. Troshin, *Mnogomernye statisticheskie metody*. Moskwa, Financy i Statistika, 2003.
8. A. A. Khalafyan, *STATISTICA. Statisticheski analiz dannyh*. Moskwa: Binom-Press, 2007.

В.П. Розен, д-р техн. наук, проф., ORCID 0000-0002-0440-4251
Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»
Л.В. Давыденко, канд. техн. наук, доц., ORCID 0000-0002-0176-2045
Луцкий национальный технический университет
Н.В. Давыденко, асист., ORCID 0000-0002-9722-745X
Национальный университет водного хозяйства и природопользования

УЧЕТ ЦИКЛИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ ПРОЦЕССА ВОДОПОДАЧИ ВО ВРЕМЯ КОНТРОЛЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ НАСОСНЫХ СТАНЦИЙ

Рассмотрены вопросы совершенствования контроля эффективности электропотребления объектов водоснабжения путем учета влияния циклических изменений внешней среды. Обоснованно взаимосвязь эффективности электропотребления и водопотребления, на которое влияют сезонные и социальные факторы. Предложена процедура выявления циклических изменений процесса водоподачи, которая предусматривает поиск сходства в суточных графиках расходы воды из сети водоснабжения и формирования групп однотипных графиков с помощью методов кластерного и дискриминантного анализа. Ее реализация позволяет определить временной период для сбора данных по определяющих переменных, а также осуществить формализованное описание режима водоподачи для планирования технологических параметров и определения базового уровня энергопотребления. Для обеспечения корректного контроля эффективности электропотребления предложена процедура распознавания принадлежности суточных графиков расхода воды в один из типичных классов. Использование предложенных процедур позволяет учитывать изменение фактических условий функционирования насосных станций, обусловленную влиянием сезонных и социальных факторов.

Ключевые слова: эффективность электропотребления, контроль электропотребления, базовый уровень электропотребления, насосная станция водоснабжения.

Надійшла 17.04.2018

Received 17.04.2018

ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES

УДК 621.311

D. Filyanin, assistant, ORCID 0000-0003-3576-3633
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kiev Polytechnic Institute»

IDENTIFICATION OF HARMONIC DISTORTION SOURCES IN DISTRIBUTION SYSTEMS USING THE DISCRETE FOURIER TRANSFORM ON PERIODS

The presence of non-linear loads and the increase in the number of systems of distributed generation of electricity lead to a distortion of the voltage and current waveform in distribution systems (DS), то есть к появлению гармоник тока и напряжения. In this case, the power system is obliged to supply electricity only to the fundamental frequency of 50 Hz with constant amplitude. Power supply organizations usually disclaim responsibility for the causes of harmonics by introducing standards or recommendations for limiting the levels of harmonic components in the points of common connection of consumers. These documents do not take into account the composition of DS equipment and, accordingly, the damage from this harmonics for network equipment and consumer equipment. The urgency of the work is due to the need to reliably identify the sources of harmonic distortion in the supply system for the effective functioning of the system of penalties and fines and to more effectively determine the list of measures to improve the electric power quality. The paper reviews the existing methods for distortion sources identification in supply systems. In most cases, the fast Fourier transform (FFT) is used as a method of harmonic analysis to determine the sources of distortion, which in the case of a rapidly changing non-linear load does not reliably determine the sources of distortion and the degree of participation of each DS's subject in the power distribution of higher harmonics. In order to detail the frequency content of the signal at the measurement interval, the spectral points obtained as a result of the FFT were calculated using the Discrete Fourier Transform (DFT). A new approach to the harmonic sources identification is proposed using a method based on the measurement of harmonic power flux sense using the Discrete Fourier Transform on periods by the example a distribution network model.

Key words: power quality, harmonics, nonsinusoidal conditions, harmonic ratio, identification of distortion source, Fast Fourier Transform, Discrete Fourier Transform.

Introduction. The presence of nonlinear loads and the growth of the number of distributed generation systems lead to a distortion voltage and current waveform in the distribution systems (DS), i.e., to the appearance of current and voltage harmonics. But power system is duty to supply electric power only on the fundamental frequency 50 Hz with constant amplitude.

The problem of harmonics in DS is not new. As early as the 30s of the 20th century, distortions current and voltage waveform were observed in the generators. The impact of harmonics is entails a malfunction of the power equipment and harmful effects on consumers' electrical receivers. Some effects of harmonics [1, 2]:

1. Outage of capacitor banks. When the harmonics exceed the allowable levels, the capacitor banks do not change their characteristics, but they quickly fail.
2. Influence on power line communication. Harmonics is interference for the carrier frequency of power line communication transmitting equipment, which causes data loss and incorrect operation of remote equipment using this type of communication.
3. Increased power loss and overheating of synchronous and asynchronous machines.
4. Increasing voltages or currents harmonic in the distribution network due to series or parallel resonances.
5. Cable insulation fault as a result of overvoltages caused by harmonics.
6. Interference for telecommunication.
7. Effect on the accuracy of metering devices. [3].
8. Malfunctions of protection devices or decline of their characteristics. Semiconductor and microprocessor systems are particularly sensitive to harmonics.
9. Influence on frequency-regulated drives and excitation systems of power plant generators.
10. Shaft vibration of asynchronous and synchronous machines.
11. Unstable operation of digital relays using algorithms based on the analysis of a sample of data or the

determination of the zero crossing voltage or current.

The effects of harmonics impact also depend on the harmonic sources, its location in the DS and the characteristics of the network [1]. The same harmonics from different sources can produce a different effect, depending on their phase with respect to the fundamental [2].

According to European research institutions, as a result of the low quality of electrical energy in industry, there is a loss of more than 150 billion euros per year. Of these, harmonic effects account for 1.3 billion euros [4]. But if we take into account the impact of harmonics on the relay protection equipment and the possible outages of consumers, the losses can amount to more than 100 billion euros [4].

Energy supply organizations usually disclaim responsibility for the causes of the appearance of harmonics, introducing standards or recommendations to limit the levels of harmonic at the point of common connection [2]. These documents do not take into account the type of the DS equipment and, accordingly, the damage that harmonics can cause to network equipment and consumer equipment.

Losses subjects of the process of distribution of electrical energy from the decline of its quality in excess of permissible rates [5], must be paid by the distortion sources. For this, it is necessary to determine the harmonic sources and to assess the degree of participation of each to stimulate the distortion sources to install compensating equipment with the help of a system of penalties and fines.

Analysis of references. There is not yet available a generalized method that can provide distortion sources detection [6].

In the references [7-12] two groups of approaches to the distortion sources detection of the voltage waveform at the point of common connection (PCC) are distinguished [13]:

1. A group based on measurements in the PCC with known or unknown impedance of the network and the consumer;
2. A group based on measurements taken at different points in the supply system, using state estimation techniques [14].

The second group of approaches for detection of harmonic sources is used for transmission lines and includes complex algorithms for optimizing the placement of sensors throughout the power supply system for distortion sources assessment (for example, [15]).

We are interested in the distribution network, in which a tree-shape structure with a single power source distinguishes them from complex-closed transmission lines and determines the direction of the power flux of the fundamental harmonic [16]. Since it is necessary to monitor each subject of the DS (by analogy with energy metering), the issue of optimizing the location of metering devices points is not put.

Let's consider the methods of the distortion sources detection related to the first group:

1. Methods based on harmonic power flux sense [17]:

$$P_i = \frac{U_{ic}I_{ic} + U_{is}I_{is}}{2} \quad Q_i = \frac{U_{ic}I_{is} - U_{is}I_{ic}}{2}, \quad (1)$$

where P_i , Q_i – active and reactive power of the i -th harmonic; U_{ic} , U_{is} – the cosine and sine components of the amplitude of the i -th harmonic of voltage; I_{ic} , I_{is} – the cosine and sine components of the current amplitude of the i -th harmonic.

2. The method of the deforming and non-deforming load [18], according to which the measured current $i(t)$ the sum of the non-deforming $i_n(t)$ and deforming $i_d(t)$ currents:

$$i_n(t) = \sum_{k=1}^n \frac{I_1}{U_1} \sqrt{2} U_k \sin(k\omega_1 t + \theta_k + k(\phi_1 - \theta_1)) \quad (2)$$

$$i_d(t) = i(t) - i_n(t) \quad (3)$$

where U_1 , I_1 – rms voltage and current of the first harmonic; θ_1 , ϕ_1 – the phase angles of the current and voltage first harmonic; θ_k – the phase angle of the k -th voltage harmonic.

3. Method of distorting and non-distorting current [19]. The load is represented as an equivalent linear resistance to the first harmonic:

$$|Z_1| = \frac{U_1}{I_1}, \quad (4)$$

where U_1 , I_1 – the rms voltage and current of the first harmonic, measured in the PCC.

Then:

$$R = |Z_1| \cos \varphi_1, \quad X_1 = |Z_1| \sin \varphi_1, \quad (5)$$

$$L = \frac{X_1}{2\pi f_1}, \quad (6)$$

where R – the active component of the load impedance; X_1 – the reactance load to the first harmonic; φ_1 – the phase difference between the voltage and current vectors of the first harmonic, f_1 - the frequency of the network (50 Hz), L – the inductance of the load.

Load reactance to harmonic components:

$$X_k = 2\pi k f_1 L, \quad (7)$$

where k – the order of the harmonic.

Without considering skin effect and supposing R independent on frequency:

$$|Z_k| = \sqrt{R^2 + X_k^2} \quad (8)$$

$$\varphi_k = \text{tg}^{-1} \frac{X_k}{R} \quad (9)$$

Current consumed by the ideal linear load:

$$i_L(t) = \sum_{k=1}^n \frac{U_k}{|Z_k|} \sqrt{2} \sin(2\pi k f_1 t + (\theta_k - \varphi_k)), \quad (10)$$

where θ_k – the phase angle of the k -th harmonic voltage vector; φ_k - the phase difference between the voltage and current vectors of the k -th harmonic.

A non-linear current is the difference between the measured current and the calculated ideal current:

$$I_{nL}(t) = i(t) - i_L(t), \quad (11)$$

where $i(t)$ - the measured current.

A comparative analysis of these methods of distortion source detection is given in [13].

In the above described harmonic sources detection methods all measurements are made at the PCC. The second and third of the listed distortion sources detection methods in the DS are founded on the assumption of linearity of the load impedance at all frequencies, which is not entirely correct. For example, presence of the harmonic filter reduces to zero this assumption. Most universal is the power flux sense method generated by the harmonic source, since only measured values are used there without any assumptions. The drawback of power flux sense method is the lack of consideration of the mutual fluxes of the distortion power that arise when there are several harmonic sources in the DS [20]. Actually, the EMF of harmonic sources can have various values and internal impedances. When measuring of the harmonics voltage in the PCC, we get some total value - the resultant value impact of all distortion sources in the network.

To minimize the effect of mutual compensation of secondary powers a method for detecting harmonics power flux using the technology of distributed measurements is proposed in [21–23].

As a method of harmonic analysis, the Fast Fourier Transform is used in most cases to detection distortion sources, which does not allow reliably identify the distortion sources and the degree of participation of each subject of DS in the distribution of secondary power of higher harmonics in the case of an fast-variable nonlinear load. Application the wavelet transforms solves this problem only partially due to problem the transition from wavelet coefficients to harmonics. Hence, for reliable identify of distortion sources and the degree of participation of each DS's subject in distribution of harmonics power relevant problem of choosing the method of harmonic analysis.

Objectives and purposes of study. The purpose of this work is to increase the reliability identify of distortion sources and increase reliability of detecting the degree of participation of each subject of DS in distribution of harmonics power.

To achieve this purpose, it is necessary to solve the following tasks:

- create a model of DS with several fast-variable sources of harmonics;
- measure the magnitude and sign of the harmonics power, at all connection points of the DS's subjects;
- to draw conclusions from the results of measurements.

Results of study. A feature of the FFT is that with this conversion all components of the output spectrum of the signal are calculated at once. As a result, the original signal $x(t)$ is represented as sine's sum (harmonics) of various frequencies:

$$x(t) = A_1 \sin(\omega t + \alpha_1) + A_2 \sin(2\omega t + \alpha_2) + \dots + A_n \sin(n\omega t + \alpha_n), \quad (12)$$

where A_1, A_2, \dots, A_n – the amplitudes harmonic components of signal $x(t)$; ω - the angular frequency; $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ – the harmonic components phase angle of the signal; n – the maximum harmonics order.

It can be argued that the FFT is an indicator of the presence of certain harmonic components in the signal [24].

According to [25], for distribution systems with a frequency of 50Hz, an 10 periods of the fundamental harmonic is taken as sample interval for measuring the power quality indicators.

With the aim of detail the frequency content of the signal in the sample interval, we make computation the spectrum points obtained as a result of the FFT applying the Discrete Fourier Transform (DFT) (Fig. 1).

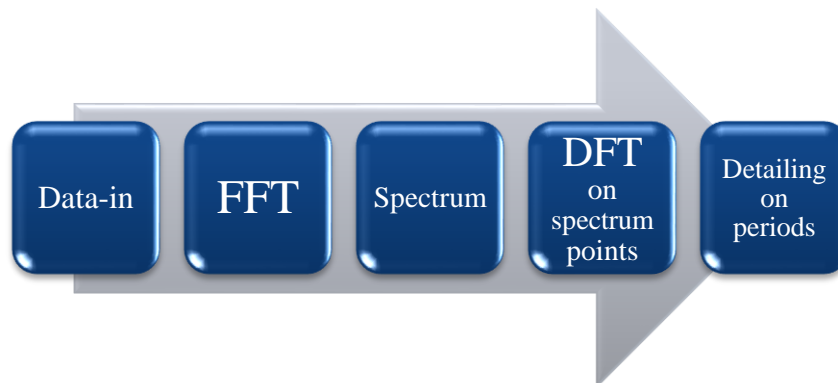


Figure 1. Improvement of the harmonic analysis method [24]

The possibility to analyze the source signal for each harmonic separately is a specific feature of the DFT with respect to the FFT.

To do this, multiply each period of the signal by sine and cosine of individual amplitude with frequencies obtained as a result of the FFT signal and integrate over the interval 2π . As a result, for each harmonic component on the l -th period of the sample interval, we obtain a set of equations [24]:

$$\begin{cases} A_{kl} \pi \cos \alpha_{kl} = a_{kl} \\ A_{kl} \pi \sin \alpha_{kl} = b_{kl} \end{cases}, \quad (13)$$

where A_{kl} , – the amplitude of the k -th harmonic on the l -th period of the sample interval; k – harmonic order; $l=1 \div 10$ – the serial number of the measurement interval period; α_{kl} – the phase angle of the k -th harmonic at the l -th sample interval period; a_{kl} – the integral sum over the interval 2π of product of the signal by the individual amplitude sine of the k -th harmonic on the l -th of the sample interval period; b_{kl} – the integral sum over the interval 2π of product of the signal by the individual amplitude cosine of the k -th harmonic on the l -th of the sample interval period.

The set of equations (13) is a trigonometric form of a complex number $z_{kl}=a_{kl}+jb_{kl}$. Then the amplitude of the k -th harmonic on the l -th sample interval period:

$$A_{kl} = \frac{|z_{kl}|}{\pi}, \quad (14)$$

where $|z_{kl}|$ – the absolute value of the complex number z_{kl} .

The phase angle of the k -th harmonic on the l -th sample interval period:

$$\alpha_{kl} = \arg z_{kl}, \quad (15)$$

where $\arg z_{kl}$ – the argument of the complex number z_{kl} .

Thus possible to localize the moments of beginning and ending occurrence of the higher harmonics accurate to one period of the fundamental frequency.

For the current and voltage measured at the connection nodes of the DS subjects, on the sample interval we have complex current and voltage matrixes for each harmonic:

$$\dot{U}_k = [\dot{U}_{k1} \quad \dot{U}_{k2} \quad \dots \quad \dot{U}_{kl} \quad \dots \quad \dot{U}_{k10}], \quad (16)$$

$$\dot{I}_k = [\dot{I}_{k1} \quad \dot{I}_{k2} \quad \dots \quad \dot{I}_{kl} \quad \dots \quad \dot{I}_{k10}], \quad (17)$$

where \dot{U}_k – complex voltages matrix of the k -th harmonic on the measurement interval; \dot{I}_k – complex currents matrix of the k -th harmonic on the measurement interval; \dot{U}_{kl} – the complex value of the k -th harmonics voltage on the l -th period of the sample interval; \dot{I}_{kl} – the complex value of the k -th harmonics current on the l -th period of the sample interval; $l=1 \div 10$ – serial number of the period on the sample interval; k – harmonic order.

The active power of the k -th harmonic is:

$$P_k = U_k I_k \cos \varphi_k, \quad (18)$$

where U_k – the rms value of the k -th harmonics voltage; I_k – the rms value of the k -th harmonics current; φ_k – the phase difference between the voltage and current of the k -th harmonic; k – harmonic order.

Elementwise multiplication (16) by (17), using expression (18), given us the scalar matrix of the k -th harmonics active power on the sample interval:

$$\mathbf{P}_k = [P_{k1} \ P_{k2} \ \Lambda \ P_{kl} \ \Lambda \ P_{k10}], \quad (19)$$

where P_{kl} – the active power of the k -th harmonic on the l -th period of the sample interval; k – harmonic order; $l=1 \div 10$ – serial number of the period on the sample interval.

Since, in the case of an fast-variable nonlinear load, the magnitude and sign of the harmonics power flux at the sample interval vary, then the arithmetic mean value of the elements of the matrix (17) is taken as the power of the k -th harmonic on the sample interval:

$$P_k^{DFT} = \frac{1}{10} \sum_{l=1}^{10} P_{kl} \quad (20)$$

In the case of a steady state nonlinear load, the power of the k -th harmonic consumed or generated by the i -th subject of the DS, calculated using the FFT and the power of the k -th harmonic calculated by the described algorithm using of the DFT on periods will be the same:

$$P_{ki}^{FFT} = P_{ki}^{DFT}, \quad (21)$$

where P_{ki}^{FFT} – the k -th harmonics power of the i -th DS's subject, calculated using FFT algorithm; P_{ki}^{DFT} – the k -th harmonics power of the i -th DS's subject, calculated using DFT on periods algorithm.

Symptom of the fast-variable nonlinear load is the inequality:

$$\frac{P_{ki}^{FFT}}{P_{ki}^{DFT}} \neq 1 \quad (22)$$

For a correct distribution of compensation payments, it is expedient to determine not only the sources of distortions, but to estimate the degree of participation of each DS's subject in the distribution of the harmonics power. As a participation criterion of each DS subject in distribution of the harmonics power, the distribution coefficient by k -th harmonic is used – the ratio of the k -th harmonic active power of each subject of DS to the aggregate active power of the corresponding harmonic generated by all distortion sources, taking into account the sign [23].

The formula for determining the distribution coefficient of the i -th DS's subject by the k -th harmonic:

$$K_{ki}^{DFT} = \frac{P_{ki}^{DFT}}{P_{\Sigma k}^{DFT}}, \quad (23)$$

where $P_{\Sigma k}^{DFT}$ – the k -th harmonics aggregate power, calculated using DFT on periods algorithm.

The value of $P_{\Sigma k}^{DFT}$ is the sum of the active powers of all the sources of the k -th harmonic calculated using the DFT on periods algorithm:

$$P_{\Sigma k}^{DFT} = \sum P_{ki,source}^{DFT}, \quad (24)$$

where $P_{ki,source}^{DFT}$ – the power of the i -th source of the k -th harmonic, calculated using the DFT on periods algorithm.

$P_{ki,source}^{DFT}$ is determined from the condition:

$$P_{ki,source}^{DFT} = \begin{cases} 0 & \text{if } P_{ki}^{DFT} \geq 0 \\ P_{ki} & \text{if } P_{ki}^{DFT} < 0, \end{cases} \quad (25)$$

where P_{ki}^{DFT} – the k -th harmonics power of the i -th DS's subject, calculated using DFT on periods algorithm.

At the fig. 2 an algorithm is presented that allows to determine the type of distortion source (fast-variable or steady state) and the degree of participation of each DS's subject in the distribution of harmonics power, as well as other additional information that allows to optimize the operation of the distribution system.

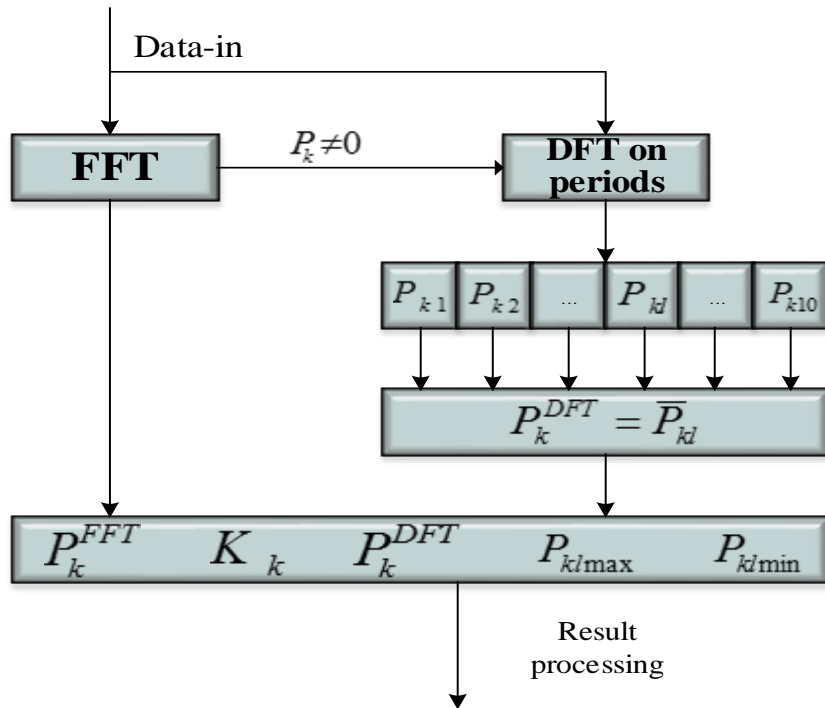


Figure 2. Algorithm of the method for determining the type of distortion source and the degree of participation of each DS's subject in distribution of harmonics power at the sample interval

For the study, the DS scheme was simulated, with sources of the 3rd harmonic (Fig. 3).

The circuit is powered from the source 110kV 50Hz via the step-down transformer 110 / 10kV 40 MVA. EMF E_1, E_2 , loads 1 and 2, the switches SW1 and SW2 form a distortion sources, in which the loads 1 and 2 themselves is an internal resistance, and the switches SW1 and SW2 simulating the fast-variable sources of distortion.

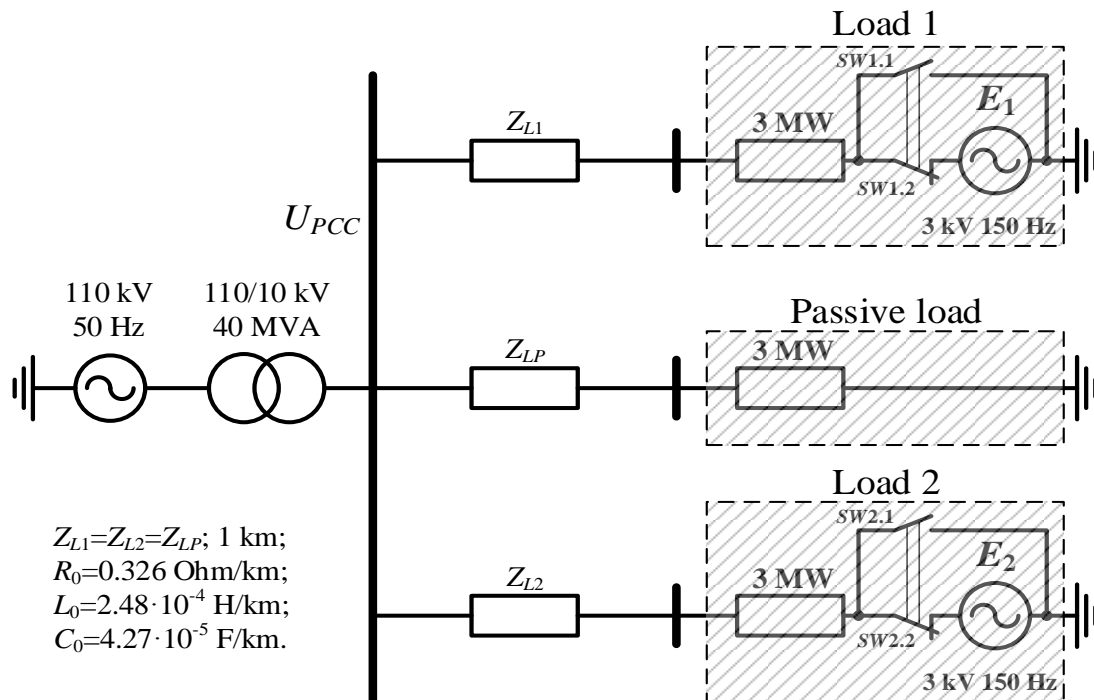


Figure 3. Schematic diagram of the DS's model with two distortion sources E_1 and E_2 , where Z_{L1}, Z_{L2}, Z_{LP} – the impedance of the cables lines, which supplying the load 1, load 2 and passive load; E_1, E_2 – EMF of harmonics generated in load 1 and load 2, respectively; SW1, SW2 – switches that model the variable source of distortion

For the analysis of this DS's model, the following operation modes were chosen:

1. $E_1=6000V$ with phase 0° and $E_2=3000V$ with phase 0° (E_1 and E_2 are in-phase). In this mode, E_2 operates over the entire sample interval, and E_1 during the first five periods of the fundamental frequency, i.e., half the sample interval (Fig. 4a).

2. $E_1=6000V$ with phase 0° and $E_2=3000V$ with phase 180° (E_1 and E_2 are opposite). In this mode, E_2 operates over the entire sample interval, and E_1 during the first five periods of the fundamental frequency, i.e., half the sample interval (Fig. 4b).

3. $E_1=30000V$ with phase 0° and $E_2=3000V$ with phase 0° (E_1 and E_2 are in-phase). In this mode, E_2 operates over the entire sample interval, and E_1 over only first period of the fundamental frequency (1/10 of the sample interval), i.e., the overvoltage caused by the harmonic source (Fig. 4c).

4. $E_1=6000V$ with phase 0° and $E_2=6000V$ with a phase of 180° (E_1 and E_2 are opposite). In this mode, E_1 operates over the first five periods of the fundamental frequency harmonic at the sample interval, and E_2 over the remaining five periods of the fundamental frequency, i.e., the distorting effect of harmonic sources at the sample interval is separate by time (Fig. 4d).

The magnitude and sign of the 3rd harmonic power were studied at the sample interval, depending on the distortion source power, the effect duration, the location in the network, and the measurement point. The measurements were doing in the PCC and at the connecting terminals of all DS subjects. For detection the harmonic spectrum of the current and voltage, was used the FFT and DFT on periods algorithms. The active power of the k -th harmonic, consumed by the i -th cable line, is defined as the difference between the power measured at the beginning of the line (PCC) and at the end of the line (consumer terminals) [23]:

$$P_{L_{ik}} = P_{ikPCC} - P_{ik}, \quad (24)$$

where P_{ik} – the active power of the k -th harmonic of the i -th consumer.

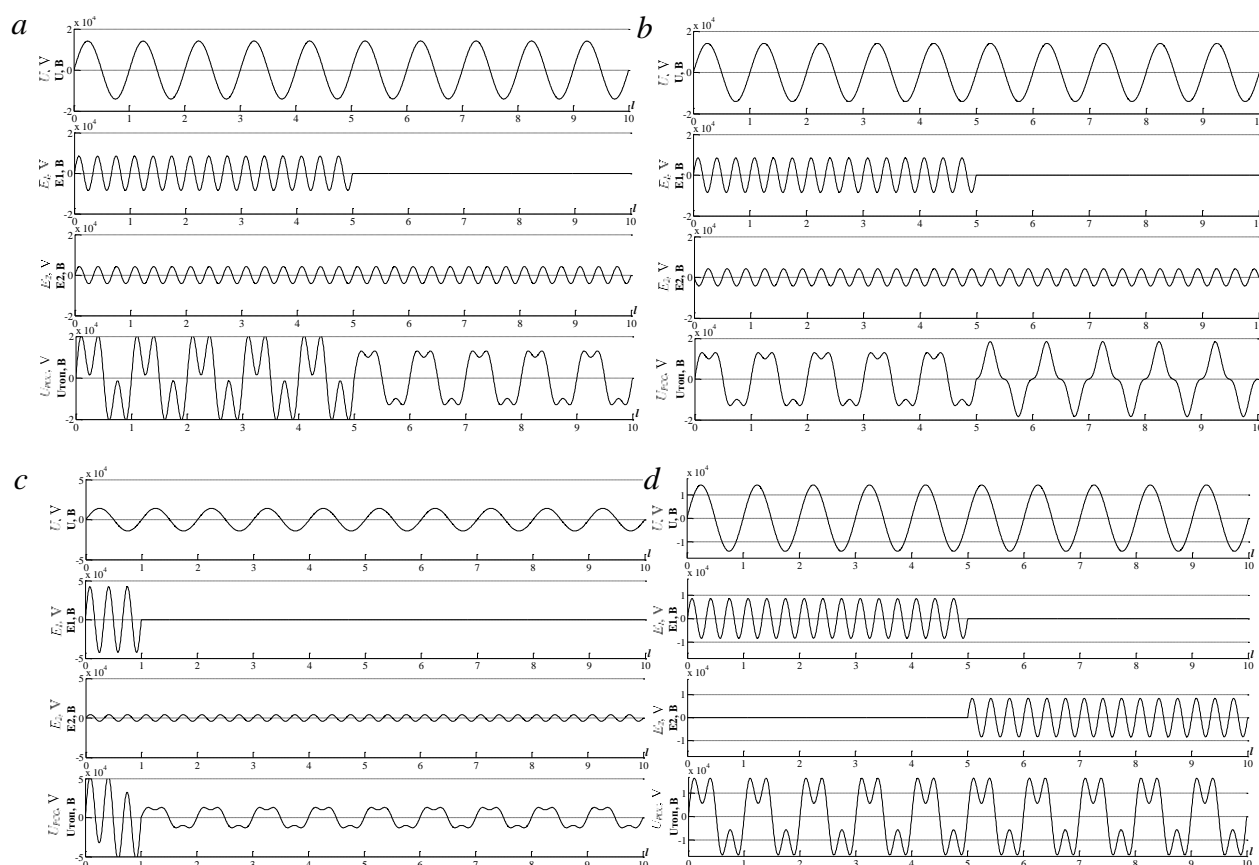


Figure 4. Diagrams of the effect of distorting loads on the voltage waveform at the PCC for mode 1 (a), mode 2 (b), mode 3 (c), and mode 4 (d), where U – the fundamental harmonics voltage, E_1 – the distortion EMF distortion in load 1; E_2 - EMF distortion in load 2; l – the serial number of the period of the fundamental harmonic at the sample interval

The results are shown in Table 1.

Table 1.

The power of the 3rd harmonic of all subjects of model of DS for the different operating modes

| Parameter | Mode 1 | Mode 2 | Mode 3 | Mode 4 |
|------------------|----------|----------|----------|----------|
| P_{31}^{FFT} | -3186,75 | -1170,5 | -2780,43 | -1134,35 |
| P_{31}^{DFT} | -6287,27 | -4159,63 | -30273,6 | -4489,62 |
| P_{32}^{FFT} | -3192,28 | -1204,74 | -2791,08 | -1197,58 |
| P_{32}^{DFT} | -2425,47 | -461,24 | 4161,435 | -4559,01 |
| P_{3P}^{FFT} | 3121,95 | 0 | 3204,146 | 0 |
| P_{3P}^{DFT} | 3888,391 | 744,3795 | 10153,96 | 2977,518 |
| P_{3SYS}^{FFT} | 520,1117 | 0 | 410,0289 | 0 |
| P_{3SYS}^{DFT} | 685,0428 | 152,5759 | 1860,712 | 610,3036 |
| P_{3L1}^{FFT} | 1378,522 | 1170,5 | 1113,63 | 1134,346 |
| P_{3L1}^{DFT} | 2702,909 | 2490,717 | 12872,03 | 2708,001 |
| P_{3L2}^{FFT} | 1380,854 | 1204,739 | 1125,754 | 1197,581 |
| P_{3L2}^{DFT} | 1419,835 | 1199,471 | 1316,631 | 2617,886 |
| P_{3LP}^{FFT} | -22,4045 | 0 | -282,055 | 0 |
| P_{3LP}^{DFT} | 16,56659 | 33,7301 | -91,217 | 134,9204 |

When analyzing the results, we saw a significant difference in the third harmonic power, calculated using FFT and calculated using DFT by periods. Moreover, for all subjects of the DS model the power of the 3rd harmonic, calculated using DFT on periods, greater in magnitude than the power of the third harmonic calculated using FFT. We can be concluded, that in case of an fast-variable nonlinear load when using only FFT, there is an underestimation of damage to the DS's electrical equipment. It is also noteworthy, that for modes 1 and 3 in the case using FFT, the cable line feeding the passive load is detecting as a harmonic distortion source, which does not match to the physical properties of this DS's subject.

Conclusions:

- for detection of distortion sources is advisable to use the harmonic power flux method with using the technology of distributed measurements;
- "transit" elements of DS (transformers, cable lines) are consumers/generators of harmonics active power;
- existing methods of harmonic analysis do not allow authentically detection the distortion sources and the degree of participation of each subject of DS in the distribution of the harmonics power in the presence of fast-variable nonlinear loads in DS;
- to increase authentically detection of distortion sources and the degree of participation of DS's subjects in the distribution of the harmonics power in the case of fast-variable distorting loads, it is necessary to jointly use the FFT and DFT algorithms on points of spectrum, obtained as a result of the FFT.

References:

- [1] *Power Quality Harmonics Analysis and Real Measurements Data*, Ed. by Prof. G. Romero. InTech, 2011.
- [2] N. N. Kharlov. *Electromagnetic compatibility in the power industry*. Tomsk: TPU Publishin, 2007.
- [3] A. V. Voloshko and D. V. Filyanin. *The impact of power quality on the accuracy of meter reading: a review of study*. Transactions of Kremenchuk Mikhaïlo Ostrohradskyi National University, vol. 4 (87), 2014, pp. 38–43.
- [4] J. Manson and R. Targosz. *European Power Quality Survey Report. November 2008*. Available: <http://www.leonardo-energy.org/sites/leonardo-energy/files/root/pdf/2009/PQSurvey.pdf> (accessed 04 January 2016).
- [5] EN 50160:2014. *Voltage characteristic of electricity supplied by public electricity network* (EN 50160 2010, IDT). K: Ministry of economic and trade of Ukraine, 2014.

- [6] IEEE Std 1459-2010. *Definitions for the measurement of electric power quantities under sinusoidal, nonsinusoidal, balanced, or unbalanced conditions*. IEEE Standard 1459, 2010.
- [7] V. E. Tonkal V. E., A. V. Novoseltsev and other. *Energy balance in electrical circuits*. K.: Naukova dumka, 1992.
- [8] A. Ferrero, A. Menchetti and R. Sasdelli. *Measurement of the Electric Power Quality and Related*. European Transactions on Electric Power. V. 6, № 6, 1996, pp. 401–406.
- [9] L. S. Czarnecki, T. Świetlicki. *Power in nonsinusoidal networks, their analysis, interpretation and measurement*. IEEE Trans. Instrum. Measur. V. 39, № 2, 1990, pp. 340–345.
- [10] A. E. Emanuel. *On the Assessment of Harmonic Pollution*. IEEE Transaction on Power Delivery. V. 10, № 3, 1995, pp. 1693–1698.
- [11] P. J. Rens and P. H. Swart. *On Techniques for the Localization of Multiple Distortion Sources in Three-Phase Networks: Time Domain Verification*. ETEP. V. 11, № 5, 2001, pp. 317–322.
- [12] P. H. Swart, M. J. Case and J. D. Van Wyk. *On Techniques for Localization of Sources Producing Distortion in Electric Power Networks*. ETEP. V. 4, № 6, 1994, pp. 485–490.
- [13] R. S. Herrera, A. Pérez, P. Salmerón, J. R. Vázquez and S. P. Litrán *Distortion Sources Identification in Electric Power Systems*. Department of Electrical Engineering E.P.S., Huelva University. Available: http://www.uhu.es/geyer/Congresos_inter/congresos%20internacionales/CI_61.pdf. (accessed 20 January 2016).
- [14] G. T. Heydt. *Identification of Harmonic Sources by a State Estimation Technique*. IEEE Trans. On Power Delivery. V. 4, № 1, 1989, pp. 569–576.
- [15] L. F. Beites, M. Alvarez and A. Díaz. *Sensor optimum location algorithm for estimating harmonic sources injection in electrical networks*. International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'14). Cordoba, Spain, 8–10 April, 2014. Available: <http://www.icrepq.com/icrepq'14/315.14-Beites.pdf>. (accessed 20 January 2016).
- [16] A. S. Stepanov, V. I. Marugin. *On the observability of electricity distribution networks*. Power engineering, ecology, reliability, safety: Proceedings of the VII All-Russian Scientific and Technical Conference. Tomsk, 2010, pp. 46–48.
- [17] F. A. Zykin. Determining of impact consumers in the power quality distortion. *Electrichestvo*, vol. 11, 1992, pp. 13–19.
- [18] K. Srinivasan. *On Separating Customer and Supply Side Harmonic Contributions*. IEEE Trans. on Power Delivery. V. 11, № 2, 1996, pp. 1003–1012.
- [19] A. Dell'Aquila, M. Marinelli, V. G. Monopoli and P. Zanchetta. *New Power-Quality Assessment Criteria for Supply under Unbalanced and Nonsinusoidal Conditions*. IEEE Trans. on Power Delivery. V. 19, № 3, 2004, pp. 1284–1290.
- [20] G. A. Senderovich. *Determination of share participation of subjects in responsible in making unbalanced condition*. *Naukovi pratsi Donetskogo Natsionalnogo Tekhnichnogo Universytetu*, vol. 11(186), 2011, pp. 330–335.
- [21] Voloshko Anatoly V., Filyanin Daniel V. *To the issue distortion source identification on the example of simplified model of electric power system*. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering, V. 326, № 6, 2015, pp. 114–121.
- [22] A. V. Voloshko, D. V. Filyanin. Distortion source identification in the point of common coupling on the example of simplified model of electric power system. *POWER ENGINEERING: Economics, Technique, Ecology*, № 1(39), 2015, pp. 35–43.
- [23] A. V. Voloshko, D. V. Filyanin. *Distortion source identification and impact of each subjects of power supply system at harmonics power distribution*. Transaction of the Kharkiv Petro Vasilenko National Technical University of Agriculture. Technical sciences. "Problems of energy supply and energy saving in the agroindustrial complex of Ukraine". № 165, 2015, pp. 14–15.
- [24] A. V. Voloshko, D. V. Filyanin. Detection and localizatin of power quality disturbanses based on Fast Fourier Transform and Discrete Fourier Transform. *POWER ENGINEERING: Economics, Technique, Ecology*, № 3, 2017, pp. 87–94.
- [25] EN 61000-4-30:2009. Electromagnetic compatibility (EMC). Part 4-30: Testing and measurement techniques – Power quality measurement methods (IEC 61000-4-30:2008). BSI, Approved 30 April 2009.

УДК 621.311

Д. В. Філянін, асистент, ORCID 0000-0003-3576-3633

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ВИЗНАЧЕННЯ ДЖЕРЕЛ ГАРМОНІЧНИХ СПОТВОРЕНЬ В СИСТЕМАХ
ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ АЛГОРИТМУ ДИСКРЕТНОГО
ПЕРЕТВОРЕННЯ ФУР'Е ЗА ПЕРІОДАМИ

Наявність нелінійних навантажень і зростання числа систем розподіленої генерації електроенергії призводять до спотворення форми кривих напруги і струму в системах електропостачання (СЕП), тобто

до появи гармонік струму і напруги. При цьому енергосистема зобов'язана поставляти електроенергію тільки основної частоти 50Гц з постійною амплітудою. Енергопостачальні організації зазвичай знімають з себе відповідальність за причини виникнення гармонік, вводячи стандарти або рекомендації щодо обмеження рівнів гармонійних складових в точках загального присєднання споживачів. Ці документи не враховують склад обладнання СЕП і, відповідно, збитки, яких можуть завдати гармоніки мережевому обладнанню та устаткуванню споживача. Актуальність роботи обумовлена необхідністю достовірного визначення джерел гармонічних спотворень в СЕП для ефективного функціонування системи штрафів і санкцій і більш ефективного визначення списку технічних заходів щодо підвищення якості електроенергії. У статті проведено огляд існуючих методів визначення джерел спотворень в СЕП. В якості методу гармонійного аналізу при визначенні джерел спотворень в більшості випадків використовується Швидке Перетворення Фур'є (ШПФ), яке в разі різкозмінного нелінійного навантаження не дозволяє достовірно визначати джерела спотворення і ступінь участі кожного суб'єкта СЕП в розподілі потужності вищих гармонік. З метою деталізації частотного наповнення сигналу на інтервалі вимірювання було проведено розрахунок точок спектру, отриманих в результаті ШПФ, використовуючи Дискретне Перетворення Фур'є (ДПФ). На прикладі моделі розподільчої мережі запропоновано новий підхід до визначення джерел гармонік по методу, заснованому на вимірюванні знака і величини спотворюючої потужності, що визначена за допомогою алгоритму Дискретного Перетворення Фур'є за періодами.

Ключові слова: якість електроенергії, гармоніки, коефіцієнт гармонік, джерело спотворення, Швидке Перетворення Фур'є, Дискретне Перетворення Фур'є.

УДК 621.311

Д. В. Філянин, асистент, ORCID 0000-0003-3576-3633

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сикорського»

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИСТОЧНИКОВ ГАРМОНИЧЕСКИХ ИСКАЖЕНИЙ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АЛГОРИТМА ДИСКРЕТНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ФУРЬЕ ПО ПЕРИОДАМ

Наличие нелинейных нагрузок и рост числа систем распределенной генерации электроэнергии приводят к искажению формы кривых напряжения и тока в системах электроснабжения (СЭС), то есть к появлению гармоник тока и напряжения. При этом энергосистема обязана поставлять электроэнергию только основной частоты 50Гц с постоянной амплитудой. Энергоснабжающие организации обычно снимают с себя ответственность за причины возникновения гармоник, вводя стандарты или рекомендации по ограничению уровней гармонических составляющих в точках общего присоединения потребителей. Эти документы не учитывают состав оборудования СЭС и, соответственно, убытки, которые могут нанести гармоники сетевому оборудованию и оборудованию потребителя. Актуальность работы обусловлена необходимостью достоверного определения источников гармонических искажений в СЭС для эффективного функционирования системы штрафов и санкций и более эффективного определения списка технических мероприятий по повышению качества электроэнергии. В статье проведен обзор существующих методов определения источников искажения в СЭС. В качестве метода гармонического анализа при определении источников искажений в большинстве случаев используется Быстрое Преобразование Фурье (БПФ), которое в случае резкопеременной нелинейной нагрузки не позволяет достоверно определять источники искажения и степень участия каждого субъекта СЭС в распределении мощности высших гармоник. С целью детализации частотного наполнения сигнала на интервале измерения был проведен расчет точек спектра, полученных в результате БПФ, используя Дискретное Преобразование Фурье (ДПФ). На примере модели распределительной сети предложен новый подход к определению источников гармоник по методу, основанному на измерении знака и величины искажающей мощности, определенной с помощью алгоритма Дискретного Преобразования Фурье по периодам.

Ключевые слова: качество электроэнергии, гармоники, коэффициент гармоник, источник искажения, Быстрое Преобразование Фурье, дискретное преобразование Фурье.

Надійшла 27.08.2018

Received 27.08.2018

ЕКОЛОГІЧНІ ПРОБЛЕМИ В ЕНЕРГЕТИЦІ ENVIRONMENTAL PROBLEMS IN ENERGY

УДК 504.53.054 (045)

І.Л. Трофімов, канд. техн. наук, доц., ORCID 0000-0001-5539-1166

С.В. Бойченко, д-р. техн. наук, проф., ORCID 0000-0002-2489-4980

О.М. Тихенко, канд. техн. наук, ORCID 0000-0001-6459-6497

І.О. Шкільнюк, ORCID 0000-0002-8808-3570

Національний авіаційний університет

ОЦІНКА ФІТОТОКСИЧНОСТІ СУМІШЕВИХ АВІАЦІЙНИХ ПАЛИВ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ РОСЛИННИХ ТЕСТЕРІВ

Досліджено можливість використання рослинних тест-об'єктів для оцінки токсичності палив. Виявлено рослинні тест-об'єкти чутливі до забруднення сумішевыми авіаційними паливами на ранніх стадіях проростання рослин. Встановлено рослини-індикатори забруднення сумішевыми авіаційними паливами, які реагують на низький вміст палива у ґрунті, на рівні орієнтовно допустимої концентрації. Виявлено специфічність і чутливість фітотестів (салат «Лолла Росса» та редис «Рудольф»), що вказує на можливість їх використання для оцінки токсичності нафтозабруднених ґрунтів.

Ключові слова: токсичність, біотестери, рослини, авіаційне паливо, біологічне паливо, ґрунт, фітотестери, індикатори, полютанти.

Вступ

Деградація рослинного покриву та ґрунтів внаслідок техногенної діяльності людини є однією з найважливіших екологічних проблем сьогодення. Рослинність і ґрунти - могутній біохімічний бар'єр, який концентрує в собі забруднювачі різного походження.

Захист навколишнього середовища можливий лише за достовірної інформації про екологічний стан забрудненого ґрунту. За допомогою хіміко-аналітичних методів неможливо оцінити екосистеми з біологічних позицій, тому, що не враховуються ефекти синергізму, антагонізму і сумарної дії токсикантів [1, 2, 3, 4, 5]. Саме тому сучасний екологічний моніторинг у разі забруднення нафтопродуктами оптимально має включати не лише дослідження рівня нафтохімічного забруднення та змін фізико-хімічних властивостей ґрунтів, а й екологічну оцінку, проведену методами біотестування та біоіндикації. Перспективним є використання рослинних тест-об'єктів завдяки доступності, простоті проведення досліджень, економічності, достовірності. Однак, на сьогодні питання екологічної оцінки нафтозабруднених ґрунтів з використанням рослин залишається не вирішеним.

У зв'язку із цим актуальним напрямком наукових досліджень є екологічна оцінка ґрунтів забруднених нафтопродуктами з використанням рослинних тест-об'єктів, що повинна стати першим етапом діагностики якості ґрунту. Забруднення нафтою та нафтопродуктами є одним з найбільш небезпечних видів забруднення навколишнього середовища. Його негативна дія на ґрунтово-рослинний покрив, атмосферу, поверхневі та підземні води, здоров'я людей відзначається на всіх етапах промислового освоєння: добування, переробки, зберігання, транспортування і ліквідації обладнання. Найбільшого впливу зазнають водні та наземні екосистеми. Серед компонентів наземних екосистем, насамперед, забруднюється ґрунт. Завдяки високій адсорбуючій здатності, нафта та нафтопродукти тривалий час зберігаються у ньому, спричиняючи як деградацію земель, так і створюють небезпеку проникнення полютантів у живильні ланцюги, однією з ланок яких є людина.

Сучасні магістральні та регіональні літаки потребують великих запасів палива у баках, що у свою чергу зумовлює наявність об'ємних нафтобаз та складів паливно-мастильних матеріалів недалеко від аеропортів. Враховуючи великі об'єми авіаційних палив під час їх транспортування, зберігання та видачі, завжди є великий ризик проливу палив та попадання у відкритий ґрунт. Також, слід зауважити, що у засобах масової інформації все більше з'являється заохочувальної та агітаційної інформації щодо використання біологічних палив. Це питання також не обходить авіацію, і хоча на сьогодні літаки цивільної авіації не заправляють біологічним паливом, але все більше країн займаються розробкою сумішевих авіаційних палив з нафтової та природної органічної сировини. Тож, враховуючи написане вище, актуальним залишається питання оцінки токсичності авіаційних нафтового та сумішевого палив у разі їх потрапляння на ґрунт.

Як відомо, у разі забруднення нафтопродуктами відбувається порушення структурних та

функціональних характеристик ґрунтової екосистеми, зниження продуктивності земель, зміна морфологічних характеристик, фізико-хімічних та біологічних властивостей ґрунтів [6-8].

До морфологічних змін відносять: більш темний колір в порівнянні з незабрудненим ґрунтом, велику щільність, наявність масляних плівок, появу стовпчастої структури в нижній частині профілю ґрунтів [9]. У нафтозабруднених ґрунтах переважають чорні, сіро-коричневі відтінки в верхній частині профілю і темно-бурі, коричнево-бурі, буро-охристі - в нижній [10]. Зміна кольору поверхні ґрунту в результаті обгортання ґрунтових частинок нафтовою плівкою призводить до зниження його спектральної відбивної здатності, а отже до більшого його прогрівання [11].

Вертикальне просування нафти вздовж ґрунтового профілю створює хроматографічний ефект диференціації складу нафти: у верхньому, гумусовому горизонті сорбуються високомолекулярні компоненти, які містять багато смолисто-асфальтенових речовин та циклічних сполук; в нижні горизонти проникають, в основному, низькомолекулярні сполуки, які володіють більш високою розчинністю у воді, ніж високомолекулярні компоненти [12, 13].

Науковцями під час лабораторних досліджень [5, 14] встановлено, що основними процесами, які визначають міграцію вуглеводнів, є сорбція і водопроникність ґрунту. Зі збільшенням щільності ґрунту кількість адсорбованої нафти та нафтопродуктів зростає. Зі зростанням вологості ґрунту спостерігається зменшення сорбції нафтопродуктів, але збільшується глибина їх вертикальної міграції [15]. У разі надходження нафти в ґрунти піщаного гранулометричного складу, спостерігається її активна міграція з подальшим накопиченням у нижніх горизонтах, а також вихід у ґрунтові і підземні води [16]. Також, у результаті забруднення нафтою та нафтопродуктами змінюється кількість і співвідношення макро- і мікроелементів. Зокрема, різко зростає співвідношення між вуглецем і азотом за рахунок вуглецю нафти, що погіршує азотний режим ґрунтів [17]. Крім того, нафта має негативний вплив на бактерії, що беруть участь у кругообігу азоту [18].

Авторами праць [15, 19, 20] встановлено, що забруднення нафтопродуктами веде до перебудови ґрунтово-вбирного комплексу, що у свою чергу призводить до зміщення лужно-кислотних умов ґрунту та спостерігається підлужнення початково кислих і слабо-кислих ґрунтів, або підкислення близьких до нейтральних і нейтральних ґрунтів на 0,1 – 0,3 одиниці рН [20]. У разі забруднення нафтою початково нейтрального лужно-алювіального ґрунту спостерігали підкислення ґрунтового розчину на 0,8 – 1,6 одиниць рН [21].

Авторами праць [10, 17, 22, 23] досліджено, що біологічні властивості ґрунтів теж різко змінюються у відповідь на нафтове забруднення, відбувається зниження активності більшості ґрунтових ферментів. Але у працях [19, 23] вказується на збільшення активності каталази дегідрогенази, уреазі [17, 21], інвертази [24].

Багатьма дослідниками встановлено, що ароматичні вуглеводні пригнічують активність ферментів, парафінові – активізують. Зміна активності ґрунтових ферментів зазвичай корелює з чисельністю мікроорганізмів [22]. Вуглеводні нафтопродуктів впливають на мікроорганізми через трансформацію фізико-хімічних властивостей ґрунту: зменшення доступності елементів мінерального живлення, погіршення водного і повітряного режимів, зміну реакції ґрунтового середовища і структури ґрунту [25] та прямий токсичний вплив, який пов'язаний, в першу чергу, з летючими ароматичними вуглеводнями (бензолом, толуолом, ксилолом і ін.), нафталином і деякими іншими водорозчинними сполуками [17].

Аналіз публікацій показує, що вплив нафти на комплекс ґрунтових мікроорганізмів досить неоднозначний. Встановлено, що нафтове забруднення стимулює зростання певних видів і пригнічує розвиток інших, що залежить від концентрації і складу забруднювача та біологічних особливостей організмів. Найбільш чутливі до нафтового забруднення актиноміцети, нітрифікатори та целюлозоруйнуючі мікроорганізми. На противагу зниженню чисельності або ж повному випаданню найбільш чутливих ланок мікробного угруповання ґрунту, відбувається збільшення чисельності нафтоокислюючих мікроорганізмів і мікроміцетів, які використовують вуглеводні нафти як поживний субстрат.

Вплив нафтового забруднення на рослини відбувається двома шляхами: безпосередньо, внаслідок проникнення компонентів нафти через кореневу систему або продихи листків з включенням їх у метаболізм та опосередковано, через зміни фізико-хімічного складу ґрунту і відповідно порушення його біотичних властивостей. Проникнення компонентів рідких фракцій нафтопродуктів у рослинний організм через кореневу систему зумовлює мутагенні реакції, морфогенетичні і фенологічні відхилення від нормального розвитку [5].

Виявлено, що невисокі концентрації нафти та нафтопродуктів у ґрунті (за різними даними до 5 %) не чинять істотного впливу або навіть можуть стимулювати ріст рослин, збільшуючи такі показники, як схожість, біомасу, довжину наземної чи підземної частини, вміст хлорофілів у листках. При подальшому збільшенні вмісту нафти у ґрунті починає проявлятися істотний пригнічуючий вплив або ж повна загибель рослин [19, 26].

Відомо, що небезпечним вважається рівень забруднення ґрунту, який перевищує межу потенціалу самоочищення. Ґрунти вважаються забрудненими, якщо концентрація нафтопродуктів у них досягає такого значення, за якого починаються негативні екологічні зміни в навколишньому середовищі: порушується екологічна рівновага в ґрунтовій екосистемі, гине ґрунтова біота, падає продуктивність або настає загибель рослин, відбувається зміна морфології, водно-фізичних властивостей ґрунтів, знижується їх родючість, створюється небезпека забруднення підземних і поверхневих вод. Саме тому першочерговим завданням під час виконання аналізу рівня забрудненості ґрунтів є визначення допустимих або безпечних норм вмісту цього типу забруднення.

У Європі прийнято вважати верхнім безпечним рівнем вмісту нафтопродуктів у ґрунті 1-3 г/кг, початком значної екологічної шкоди – 20 г/кг і вище. В країнах ближнього зарубіжжя граничнодопустимі концентрації (ГДК) нафтопродуктів у ґрунті не розроблені, за винятком Татарстану (Росія). Для Татарстану ГДК нафтопродуктів у ґрунті становить 1,5 г/кг, що відповідає транслокаційному (фітоаккумуляційному) показнику шкідливості. Використовують також міграційний водний показник шкідливості (13,1 г/кг), міграційний повітряний (більше 5 г/кг) і загально-санітарний (більше 5 г/кг)[5].

В Україні ГДК нафти і продуктів її переробки у ґрунті не визначена, є лише посилання на орієнтовно допустиму концентрацію (ОДК) 0,2 мг/кг [27]. У джерелах [26, 28] визначена ОДК для ґрунту - 4 г/кг, яка широко використовується для аналізу забрудненості ґрунтів нафтопродуктами. Орієнтування на цей показник не може гарантувати отримання об'єктивних оцінок, особливо зважаючи на те, що кларк вмісту нафтових вуглеводнів у ґрунті в європейських країнах коливається в межах 0,01 – 0,5 г/кг, а у великих містах України досить звичні показники 1 – 3 г/кг. На територіях, прилеглих до підприємств переробки, видобування та зберігання нафтопродуктів, фон досягає 6 г/кг.

Відповідно до [29] для чорноземної зони України пропонується встановити такі градації забруднення ґрунтів нафтою та нафтопродуктами: незабруднені – менше 400 мг/кг (0,4 г/кг); слабо забруднені – 3000-6000 мг/кг (3-6 г/кг); середньо забруднені – 6000-12000 мг/кг (6-12 г/кг); сильно забруднені – 12000-25000 мг/кг (12-25 г/кг); дуже сильно забруднені – понад 25000 мг/кг (> 25 г/кг).

Висока стійкість та токсичність, мінливість вуглеводневого складу, відсутність для більшості з нафтопродуктів встановлених нормативів ГДК, неможливість урахування екологічної небезпеки сумісної дії вуглеводнів, продуктів їх розкладу та взаємодії з присутніми у воді та ґрунті іншими хімічними речовинами потребує комплексного підходу до вирішення проблеми.

Сучасний екологічний моніторинг здійснюється з обов'язковим використанням біологічних методів: біоіндикації та біотестування, що враховують весь комплекс негативних факторів дії на живий організм як множини первинних токсикантів, що потрапили в довкілля, так і сукупності продуктів реакцій між первинними хімічними сполуками [1, 2, 5, 19].

Біоіндикація забруднень, що ґрунтується на вивченні різноманітних біологічних, фізіологічних, анатомічних та інших відхилень у розвитку організмів, а також їх спільнот, які виникають під дією зовнішніх чинників, широко використовують в системі моніторингу. Ці методи відрізняються дешевиною і можливістю одночасно охопити великі території, що підлягають індикації, а також відносно простотою інтерпретації. Основною умовою успішної індикації є чітко виражена реакція-відповідь на фізичну чи хімічну дію, яка є специфічною, легко реєструється візуально чи з допомогою приладів [2, 5].

Спорідненим методом біоіндикації є біотестування, що використовується для встановлення сумарної токсичності середовища і на відміну від біоіндикації характеризує ступінь впливу забруднення на екосистему в конкретний момент відбору проби. Ці методи близькі до методів хімічного аналізу і дозволяють дати реальну оцінку токсичності при комплексному забрудненні хімічними речовинами. Повідомляється [5, 30, 31], що використання біологічних тест-систем дозволяє визначити негативні зміни в екосистемах на дуже ранній стадії, коли вони ще не проявляються у вигляді морфологічних і структурних змін і їх не можна виявити іншими методами. Це дає можливість передбачити порушення екосистеми і завчасно вжити відповідних заходів.

Завдяки доступності, простоті та оперативності біотестування отримало широке визнання в усьому світі і його все частіше використовують в системі сучасного екологічного моніторингу. Біотести рекомендовані для неперервного експрес-контролю стану навколишнього середовища промислових районів і природно-господарських комплексів, контролю шкідливих викидів підприємств, для оцінки ефективності застосованих методів детоксикації навколишнього середовища та роботи очисних споруд, екологічної паспортизації підприємств і окремих районів.

Методи біотестування повинні відповідати наступним вимогам: експресність, доступність і простота здійснення; відтворюваність і достовірність отриманих результатів; економічність, як у матеріальному відношенні, так і по трудовитратах; об'єктивність отриманих даних [3]. Основний принцип біологічного тестування зводиться до оцінки достовірної різниці будь-якого показового параметра тест-об'єкту, що вказує на повне або часткове пригнічення життєвих функцій тест-організмів у досліді (токсичне середовище) і контролі (чисте середовище).

Рослини вважаються найбільш зручними об'єктами для біомоніторингу ґрунтів, оскільки вони є первинними ланками трофічних ланцюгів, виконують основну роль у поглинанні різноманітних забруднювачів. Вони вирізняються доступністю, простою культивування, високою чутливістю до ряду забруднювачів, можливістю оцінки сумарної дії шкідливих речовин на ґрунтову екосистему. Здійснювані з допомогою них дослідження короткотривалі, прості у виконанні, не потребують складного лабораторного обладнання [5, 30, 32]. Також рослини є дешевим ресурсом біологічного матеріалу, не вибагливі до поживного середовища на початкових етапах онтогенезу, оскільки проростки і насіння самі містять потрібну кількість запасних речовин [20].

Через генетичну неоднорідність рослин, їх різні види і сорти по-різному реагують на вплив забруднюючих речовин.

Біотестування та біоіндикацію нафтозабруднених ґрунтів у агроекосистемах проводять на основі реакцій сільськогосподарських рослин із різною чутливістю до даного фактора [1, 2, 5, 23, 27, 28].

У багатьох вітчизняних та закордонних працях показана ефективність застосування насіння крес-салату (*Lepidium sativum*). Це один з найбільш часто використовуваних тест-об'єктів, що застосовується для біотестування вод, донних відкладень, ґрунтів, природних і техногенних субстратів, радіаційного впливу, впливу синтезованих хімічних речовин і їх сумішей [5]. Дана тест-культура інформативна при забрудненні середовища поллютантами різних типів (важкими металами, вуглеводнями, радіоактивними речовинами та ін.) і при комплексному забрудненні.

У працях [23, 35] повідомляється про метод визначення сумарної токсичності ґрунту з використанням насіння редису посівного (*Raphanus sativus*), що пов'язано з високою чутливістю насіння до токсичних речовин. За допомогою редису також оцінюється фітотоксичність нафтозабруднених ґрунтів.

Сорго (*Sorghumbicolor* L.) та квасоля (*Phaseolus vulgaris* L.) використовуються для визначення токсичності реактивного палива та гербіцидів. Ріст кореня проса (*Panicum miliaceum* L.) служить для визначення токсичності фенолів та хлорфенолів [36]. Показана ефективність застосування насіння цибулі ріпчастої (*Allium cepa* L.) як ефективної тест-культури для дослідження токсичного впливу широкого спектру хімічних речовин.

У своїх працях С. А. Ілларіонов [37] вивчав фітотоксичність нафтозабруднених ґрунтів, використовуючи конюшину. Показниками фітотоксичності були зниження схожості і виживання насіння, а також вага сухої біомаси вирощених рослин.

Згідно з міжнародним стандартом ISO 11269-1 для біотестування рекомендується використовувати ячмінь звичайний (*Hordeum vulgare*). Одночасно вказується, що можна застосовувати насіння й інших рослин. Міжнародний стандарт ISO 11269-2 регламентує вибирати мінімум два види рослин, при цьому один повинен бути однодольним, а інший дводольним [38].

У працях іноземних науковців [39, 40, 41, 42] цей ефект продемонстрований відносно чутливості насіння салату, сорго та гірчиці на ґрунтах, забруднених комплексом важких металів і нафтопродуктів, у тому числі ПАВ. Показано, що рослини по зниженню чутливості до токсичності ґрунтів розташовуються в наступному порядку: *Lepidium sativum* < *Sinapis alba* < *Sorghum saccharatum*.

У інших дослідженнях фітотестування забруднень (відходів фосфогіпсу, біоґрунту, наноматеріалів), проведених на насінні гірчиці білої (*Sinapis alba*), була показана доцільність застосування цієї культури, так як вона продемонструвала добру схожість і відтворюваність результатів у дослідах [34].

Авторами праці [35] встановлено відмінність реакцій насіння сільськогосподарських рослин на дію нафтопродуктів. За зменшенням чутливості до нафтопродуктів, вивчені рослини розміщуються в наступному порядку: ячмінь, редис, салат.

Під час діагностування й оцінки токсичності нафтозабруднених ґрунтів, зазвичай, враховуються такі показники, як висота рослин, кількість, довжина і ширина листків, довжина черешків, кількість і довжина пагонів, кількість квіток, кількість плодів і насіння у плоді, загальна маса рослини і маса окремих її частин тощо. Фізіолого-біохімічні та цитогенетичні параметри рослинних тест-систем є придатними для кількісної оцінки дії факторів в умовах техногенного забруднення [5, 26, 28].

Вцілому, рослини є перспективними тест-об'єктами для біомоніторингу завдяки високій чутливості до змін довкілля, що відбуваються під впливом антропогенних чинників.

Мета та задачі дослідження

Мета роботи полягала в оцінці токсичності сумішевих авіаційних палив із застосування рослинних тест-об'єктів.

Для досягнення поставленої мети були визначені такі завдання:

1. виявити рослинні тест-об'єкти чутливі до забруднення сумішевыми авіаційними паливами на ранніх стадіях проростання, встановити взаємозв'язок між вмістом авіаційного палива у ґрунті та початковими ростовими параметрами тестових рослин;

2. встановити рослину-індикатор забруднення сумішевим авіаційним паливом, яка реагує на низький вміст палива у ґрунті, на рівні орієнтовно допустимої концентрації.

Матеріал і результати досліджень

Під час проведення біотестування та біоіндикації ґрунтів забруднених сумішним авіаційним паливом, проводили пошук рослин, чутливих до нафтового забруднення і встановлювали залежності між концентрацією авіапалива у ґрунті та морфометричними показниками чутливих фітотестів.

Для експериментальних досліджень у цій роботі використовувалися рослини, які за аналізом літературних джерел найкраще показали себе для біотесту ґрунтів забруднених нафтою: насіння салату «Лолла Росса», редису «Рудольф», гороху, квасолі та огірка.

Для досліджень використовували штучно-забруднені сумішним авіапаливом ґрунти, які готували за наступною схемою: у повітряно-сухий дерново-підзолистий чистий ґрунт, просіяний через сито з отворами 1 мм, вносили авіапаливо марки JETA-1, біопаливо на основі ріпаку та сумішеве авіапаливо (JETA-1 + біопаливо на основі ріпаку). Досліди проводилися у лабораторії Альтернативних моторних палив Національного авіаційного Університету (м. Київ).

Під час висадки: горщик №1 поливали водною емульсією з концентрацією 5 % біопалива, № 2 – водною емульсією з концентрацією 10 % біопалива, № 3 – водною емульсією з концентрацією 5 % (50x50 JETA-1 – біопаливо), № 4 – водною емульсією з концентрацією 10 % (50x50 JETA-1 – біопаливо), № 5 – водною емульсією з концентрацією 5 % (30x70 JETA-1 – біопаливо), № 6 – водною емульсією з концентрацією 10 % (30x70 JETA-1 – біопаливо), № 7 – водною емульсією з концентрацією 5 % JETA-1, № 8 – водною емульсією з концентрацією 10 % JETA-1 – біопаливо.

Контрольним зразком був зразок ґрунту, який поливали чистою водою. Експеримент проводили 15 днів. Після інкубації фіксували кількість пророслих насінин, і через кожен день вимірювали висоту стебел.

Усе описане вище було повторено з насінням редису, гороху, квасолі та огірка.

Під час пророщування рослин-тестерів заміряли лінійкою довжину кореня, висоту пагона, їх відносні величини. Фіксували ріст рослин за днями пророщення.

Нами було проведено оцінку токсичності ґрунтів забруднених різними видами палив методами фітотестуванням. Встановлено лінійну залежність між пригніченням росту коренів і пагонів досліджуваних фітотестів та ступенем забруднення.

На рисунку 1 наведено вплив біопалива на основі ріпаку на ріст салату «Лолла Росса» та редису «Рудольф». Насіння гороху, квасолі та огірка під час поливання різними концентраціями авіаційного палива та біопалива на основі ріпаку майже не проростали, а пагони, що проросли гинули на 2 або 3 день. Із чого, ми зробили висновок, що ці рослини не підходять для біоіндикації авіаційних палив.

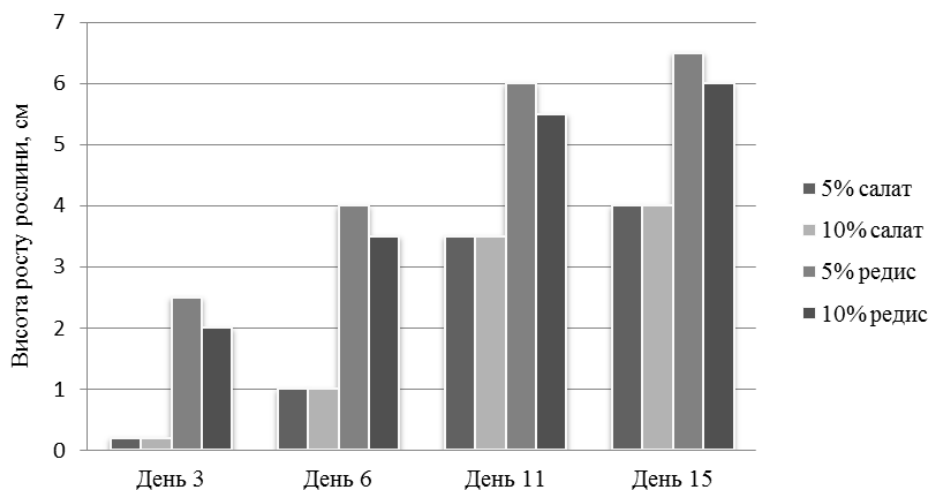


Рисунок 1 – Динаміка впливу різних концентрацій біопалива на показники росту салату «Лолла Росса» та редису «Рудольф»

Із рис. 1. видно, що додавання біопалива у різній кількості впливає на ріст салату «Лолла Росса» та редису «Рудольф». У разі збільшенні концентрації біопалива помітне прискорення росту і проростання стебел, ріст рослин також збільшується у порівнянні з насінинами, що поливали чистою водою.

На 3 день висота стебел салату политого концентрацією 50 мл – 0,2 см, висота стебел редису политого концентрацією 50 мл – 2,5 см; висота стебел салату политого концентрацією 100 мл – 0,2 см, висота стебел редису политого концентрацією 100 мл – 2 см. На 6 день висота стебел салату политого концентрацією 50 мл – 1 см, висота стебел редису политого концентрацією 50 мл – 4 см; висота стебел салату политого концентрацією біопалива 100 мл – 1 см, висота стебел редису политого концентрацією 100 мл – 3,5 см. На 11 день висота стебел салату политого концентрацією 50 мл – 3,5 см, висота стебел редису политого концентрацією 50 мл – 6 см; висота стебел салату политого концентрацією 100 мл –

3,5 см, висота стеблин редису политого концентрацією 100 мл – 5,5 см. На 15 день висота стеблин салату политого концентрацією 50 мл – 4 см, висота стеблин редису политого концентрацією 50 мл – 6,5 см; висота стеблин салату политого концентрацією 100 мл – 4 см, висота стеблин редису политого концентрацією 100 мл – 6 см. При додаванні 50 і 100 мл біопалива ми бачимо, що ріст рослин прискорюється, тобто, біопаливо працює як стимулятор.

Вплив різних концентрацій суміші «авіаційне паливо – біопаливо» на ріст салату «Лолла Росса» та редису «Рудольф».

Для оцінки токсичності ми пророщували насіння різних видів салату «Лолла Росса» та редису «Рудольф» на ґрунтах, забруднених сумішшю JET-A1 – біопаливо (50x50) у концентрації 50 та 100 мл на 1000 мл води.

Із результатів рис. 2 можна зробити висновок, що у разі збільшення концентрації суміші JETA-1-біопаливо (50x50), ріст рослини істотно не змінюється.

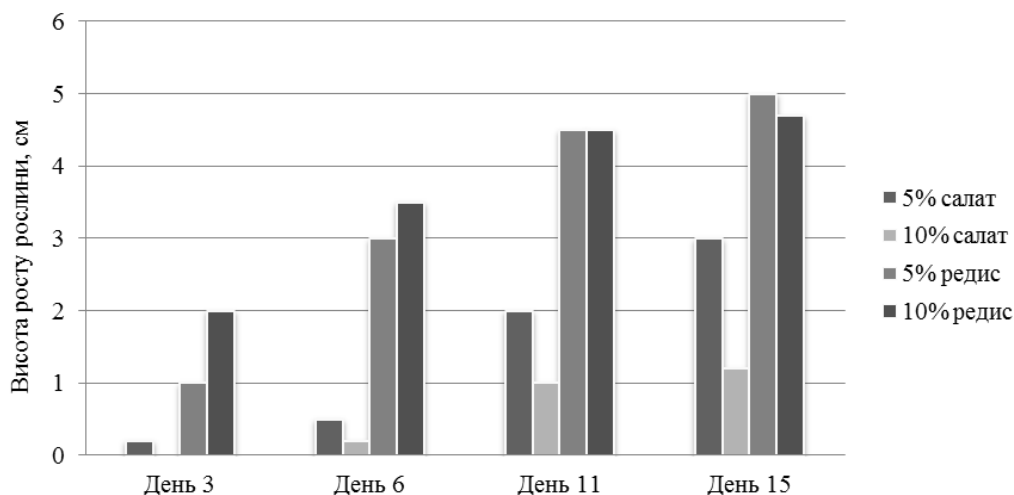


Рисунок 2 – Динаміка впливу різних концентрацій суміші авіаційного палива та біопалива (50x50) на висоту росту салату «Лолла Росса» та редису «Рудольф»

На 3 день висота стеблин салату политого концентрацією 50 мл складала – 0,2 см, висота стеблин редиса политого концентрацією 50 мл – 1 см; висота стеблин салату политого концентрацією 100 мл складала – 0 см, висота стеблин редису политого концентрацією 100 мл – 2 см. На 6 день висота стеблин салату политого концентрацією 50 мл складала – 0,5 см, висота стеблин редису политого концентрацією 50 мл – 3 см; висота стебла салату политого концентрацією 100 мл складала – 0,2 см, висота стебла редису политого концентрацією 100 мл – 3,5 см. На 11 день висота стеблин салату политого концентрацією 50 мл складала – 2 см, висота стеблин редису политого концентрацією 50 мл – 4,5 см; висота стеблин салату политого концентрацією 100 мл складала – 1 см, висота стеблин редису политого концентрацією 100 мл – 4,5 см. На 15 день висота стеблин салату политого концентрацією 50 мл складала – 3 см, висота стеблин редису политого концентрацією 50 мл – 5 см; висота стеблин салату политого концентрацією 100 мл складала – 1,2 см, висота стеблин редису политого концентрацією 100 мл – 4,7 см. У порівнянні з пробами, які були політі різними концентраціями біопалива, проби даного експерименту мають дещо пригнічену висоту стеблин. На нашу думку, це можна пояснити тим, що біопаливо виступає, як добриво (стимулятор), а авіапаливо пригнічує ріст рослин. А, оскільки, співвідношення JET-A1 –біопаливо було 50x50, то ріст рослин істотно не змінився.

Вплив різних концентрацій суміші «авіаційне паливо – біопаливо (70x30)» на ріст салату «Лолла Росса» та редису «Рудольф».

На рис. 3 можемо простежити, як додавання суміші JETA-1-біопаливо (70x30) в різних концентраціях (50 та 100мл на 1000мл води) впливає на ріст салату «Лолла Росса» та редису «Рудольф».

Як бачимо, у разі додавання 50 і 100мл суміші JETA-1-біопаливо (70x30) на 1000 мл води наявне сповільнення росту і проростання стеблин. На 3 день висота стеблин салату политого сумішшю концентрацією 50 мл складала – 0,2 см, висота стеблин редису политого сумішшю концентрацією 50 мл – 0,5 см; висота стеблин салату политого сумішшю концентрацією 100 мл складала – 0 см, висота стеблин редису политого сумішшю концентрацією 100 мл – 0,3 см. На 6 день висота стеблин салату политого сумішшю концентрацією 50 мл складала – 1,5 см, висота стеблин редису политого сумішшю концентрацією 50 мл – 2,2 см; висота стеблин салату политого сумішшю концентрацією 100 мл складала – 0,5 см, висота стеблин редису политого сумішшю концентрацією 100 мл – 1,5 см.

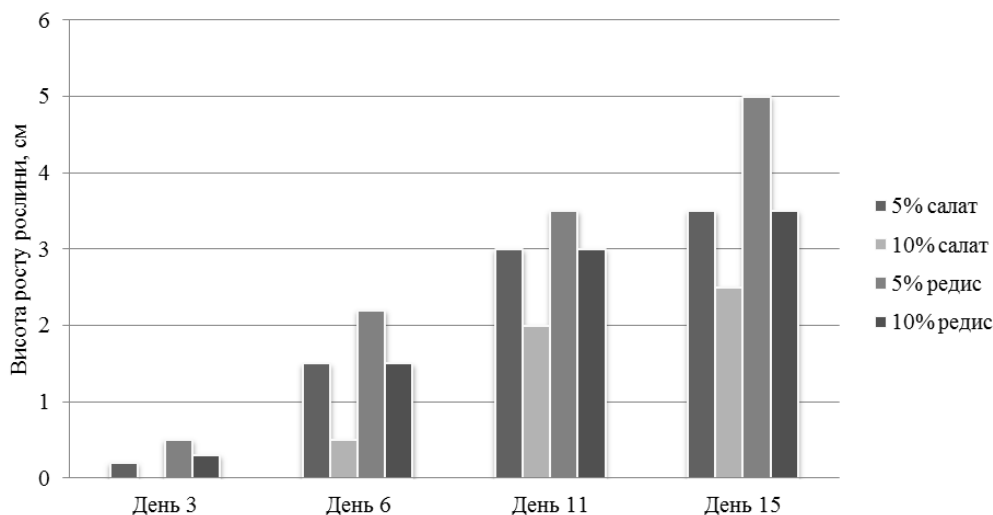


Рисунок 3 – Динаміка впливу різних концентрацій суміші авіаційного палива та біопалива(70x30) на висоту росту салату «Лолла Росса» та редису «Рудольф»

На 11 день висота стеблин салату политого сумішшю концентрацією 50 мл складала – 3 см, висота стеблин редису политого сумішшю концентрацією 50 мл – 3,5 см; висота стеблин салату политого сумішшю концентрацією 100 мл складала – 2 см, висота стеблин редису политого сумішшю концентрацією 100 мл – 3 см. На 15 день висота стеблин салату политого сумішшю концентрацією 50 мл складала – 3,5 см, висота стеблин редису политого сумішшю концентрацією 50 мл – 5 см; висота стеблин салату политого сумішшю концентрацією 100 мл складала – 2,5 см, висота стеблин редису политого сумішшю концентрацією 100 мл – 3,5 см. Як бачимо у разі додавання 50 та 100 мл суміші 70x30 JETA-1–біопаливо рослини мають гіршу динаміку росту, ніж при додаванні суміші JETA-1–біопаливо 50x50. Це можна пояснити тим, що авіаційне паливо, якого вдвічі більше, працює як пригнічувач росту рослин.

Вплив різних концентрацій авіаційного палива JETA-1 на ріст салату «Лолла Росса» та редису «Рудольф».

На рис. 4 показано, як авіаційне паливо JETA-1 впливає на ріст салату «Лолла Росса» та редису «Рудольф». Для дослідження використовувались такі концентрації JETA-1: 50 та 100 мл на 1000 мл води.

Залежності дозволяють зробити висновок, що під час збільшення концентрації авіаційного палива ріст рослини зменшується, а у разі додавання JETA-1 концентрацією 100 мл рослини майже не вирости. На 3 день висота стеблин салату политого концентрацією 50 мл складала – 0,5 см, редису политого концентрацією 50 мл – 0,6 см; висота стеблин салату политого концентрацією 100 мл складала – 0 см, висота стеблин редису политого концентрацією 100 мл – 0,2 см.

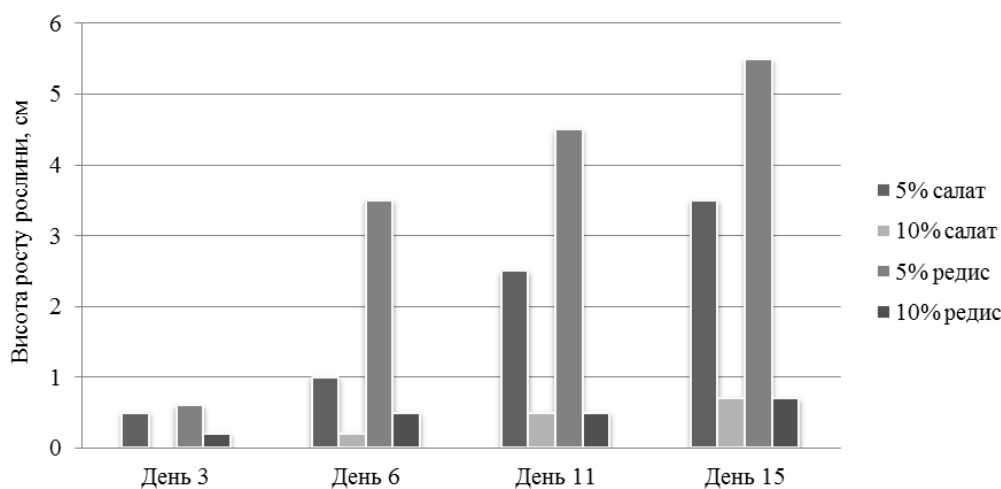


Рисунок 4 – Динаміка впливу JETA-1 на висоту росту салату «Лолла Росса» та редису «Рудольф»

На 6 день висота стеблин салату политого концентрацією 50 мл складала – 1 см, висота стеблин редису политого концентрацією 50 мл – 3,5 см; висота стеблин салату политого концентрацією 100 мл складала – 0,2 см, висота стеблин редису политого концентрацією 100 мл – 0,5 см. На 11 день висота

стеблин салату политого концентрацією 50 мл складала – 2,5 см, висота стеблин редису политого концентрацією 50 мл – 4,5 см; висота стеблин салату политого концентрацією 100 мл складає – 0,5 см, висота стеблин редису политого концентрацією 100 мл – 0,5 см. На 15 день висота стеблин салату политого концентрацією 50 мл складала – 4,5 см, висота стеблин редису политого концентрацією 50 мл – 5,5 см; висота стеблин салату политого концентрацією 100 мл складала – 0,7 см, висота стеблин редису политого концентрацією 100 мл – 0,6 см.

Висновки

1. Встановлено, що салат «Лолла Росса» та редис «Рудольф» є чутливим до вмісту авіаційного палива JETA-1 та сумішевого авіаційного палива JETA-1-біопаливо у ґрунті на ранніх стадіях проростання в широкому діапазоні концентрації полютанта 0-20 %.
2. Визначено, що для оцінки токсичності вимірювання початкових ростових параметрів цих рослин, отриманих на 6 добу росту в темноті є оптимальним.
3. Рослини: горох, квасоля та огірок не підходять для тестування токсичності авіаційного палива JETA-1 та сумішевого авіаційного палива JETA-1-біопаливо, оскільки загинули на стадії пророщування.
4. Для одержання кількісних характеристик впливу забруднювачів ми визначили залежність між реакцією рослини на стресовий фактор і дозою фактора. Для цього зіставляли відповідні параметри (схожість, довжину кореня тощо) з відповідними дозами (концентраціями) фактора з отриманням залежності «доза-ефект» («концентрація-ефект»), на основі яких побудували графіки.
5. Нами виявлено, що при додаванні авіаційного палива JETA-1 концентрацією 50 мл довжина стебла салату «Лолла Росса» та редису «Рудольф» залишилися майже тотожною пробами, які ми поливали концентраціями 70x30 JETA-1-біопаливо та зменшилася у порівнянні із пробами, які ми поливали концентраціями 50 мл біопалива і 50 мл сумішню JETA-1-біопаливо 50x50.
6. У разі поливу рослин водяною концентрацією 100 мл JETA-1 пригнічення росту стебла відбувалось більш помітно. У порівнянні з пробами, які були политі водяною концентрацією 100 мл суміші JETA-1-біопаливо (70x30) та пробами политими водяною концентрацією 100 мл JETA-1 мали вдвічі меншу висоту стебла порівняно з пробами, политими водяними концентраціями 100 мл біопалива і 100 мл суміші JETA-1-керосин (50x50). Рослини, политі концентрацією 100 мл JETA-1 мали у 4-6 разів меншу висоту стебла.
7. У результаті проведених досліджень виявлено специфічність і чутливість фітотестів (салат «Лолла Росса» та редис «Рудольф»), що вказує на можливість їхнього використання для оцінки токсичності нафтозабруднених ґрунтів.

Список використаної літератури

1. Бубнов А.Г. Биотестовый анализ – интегральный метод оценки качества объектов окружающей среды: уч.-метод. пособие / [А. Г. Бубнов, С. А. Буймова, А. А. Гуцин и др.]; под общ. ред. В. И. Гриневича; Иван. гос. хим. – технол. ун-т. – Иваново, 2007. – 112 с.
2. Васильев А. В. Экологический мониторинг токсического загрязнения почвы нефтепродуктами с использованием методов биотестирования [Электронный ресурс] / А. В. Васильев, В. В. Заболотских, О. В. Тупицына, А. М. Штеренберг // Нефтегазовое дело. – 2012. – №4. – С.242-249. Режим доступа: URL:http://ogbus.ru/authors/VasilyevAV/VasilyevAV_1.pdf
3. Маячкина Н. В. Особенности биотестирования почв с целью их экотоксикологической оценки / Н. В. Маячкина, М. В. Чугунов // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. – 2009. – № 1. – С. 84-93.
4. Саксонов М. Н. Экологический мониторинг нефтегазовой отрасли. Физико-химические и биологические методы: учеб. Пособие / М. Н. Саксонов, А. Д. Абалаков, Л. В. Данько, О. А. Бархатова, А. Э. Балаян, Д. И. Стом. – Иркутск: Иркут.ун-т, 2005. – 114 с.
5. Шевчик Л.З. Екологічна оцінка та фіторе mediaція нафтозабруднених ґрунтів / Л.З. Шевчик // Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата біологічних наук. – Львів 2017. Режим доступу: URL: http://www.dnu.dp.ua/docs/ndc/dissertations/D08.051.04/dissertation_5902f7c3b8f84.pdf.
6. Киреева Н. А. Активность карбогидраз в нефтезагрязненных почвах / Н. А. Киреева, Н. И. Новоселова, Ф. Х. Хазиев // Почвоведение. – 1998. № 12. – С. 144-148.
7. Козлов К. С. Влияние загрязнения почвы нефтепродуктами на дождевых червей: автореф. дис. ... канд. биол. наук: 03.00.16 / К. С. Козлов. – Томск, 2003. – 13 с.
8. Логинов О. Н. Биотехнологические методы очистки окружающей среды от техногенных загрязнений / Логинов О. Н., Силищев Н. Н., Бойко Т. Ф., Галимзянова Н. Ф. – Уфа: Государственное издательство научно-технической литературы "Реактив", 2000. – 100 с.
9. Шамраев А. В. Влияние нефти и нефтепродуктов на различные компоненты окружающей среды / А. В. Шамраев, Т. С. Шорина // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2009. – № 6(100). – С. 642-645.

10. Сулейманов Р. Р. Изменение буферности почв при загрязнении нефтепромысловыми водами и сырой нефтью / Р. Р. Сулейманов, Ф. И. Назырова // Вестник ОГУ. 2007. – №4. – С. 133-139.
11. Каралов А. М. Регулирование теплового режима нефтезагрязненных земель в условиях их биологической рекультивации / А. М. Каралов // VIII Всесоюз. съезд почвоведов: тезисы докладов. Кн. 1. - Новосибирск, 1989. – С. 37.
12. Бабаджанова О. Ф. Міграція нафти і нафтопродуктів у поверхневій шарі ґрунту при аварійних розливах / О. Ф. Бабаджанова, Н. М. Гринчишин, Ю. Г. Сукач // Безпека життя і діяльності людини - освіта, наука, практика: зб.наук. праць X міжнар. наук.-метод. конф. – К.: Національний авіаційний університет, 2011. – С. 22-26.
13. Елин Е. С. Биогеохимическая трансформация нефти-загрязнителя и болотного биогеоценоза при их взаимодействии / Е. С. Елин // Вестник экологии, лесоведения и ландшафтоведения. - Тюмень: Изд-во ИПСО СО РАН, 2002. – Ф 3. – С. 153-166.
14. Sikkema J. Mechanisms of Membrane Toxicity of Hydrocarbons / J. Sikkema, A. M. de Bont, B. Poolman // Microbiological REVIEWS. – 1995. – Vol. 59, F 2. – P. 201-222.
15. Тюленева В. А. К вопросу исследования фильтрации нефти в почвах / В. А. Тюленева, В. А. Соляник, И. В. Васькина // Вісник КДПУ. – 2006. – Вип. 2/2006 (37), ч. 2. – С. 110-112.
16. Безносиков В. А. Экологическая оценка почв в районе эксплуатации нефтяных месторождений в условиях Севера / В. А. Безносиков, Е. Д. Лодыгин, Б. М. Кондратенко // Международный экологический форум "Сохраним планету Земля": сборник докладов. – СПб.: Центральный музей почвоведения им. В. В. Докучаева, 2004. – С. 144-148.
17. Новоселова Е. И. Экологические аспекты трансформации ферментативного пула почвы при нефтяном загрязнении и рекультивации: автореф. дис. . док. биол. наук / Новоселова Евдокия Ивановна. – Воронеж: ВГУ, 2008. – 42 с.
18. Кабилов Р. Р. Оценка биологической активности нефтезагрязненных почв с помощью интегрального показателя / Р. Р. Кабилов, Н. А. Киреева, Т. Р. Кабилов, И. Е. Дубовик, А. Б. Якупова, Л. М. Сафиуллина // Почвоведение. – 2012. – №2. – С. 184-188.
19. Алиев И. Н. Естественное облесение и биологическая рекультивация нарушенных земель северного Кавказа (на примере Кабардино-Балкарии): автореф. дис. док.с.-х. н.: 06.03.01 / Алиев Игорь Нажафович. – Волгоград, 2012. – 42 с.
20. Леднев А. В. Изменение свойств дерново-подзолистых суглинистых почв под действием загрязнения продуктами нефтедобычи и приемы их рекультивации: автореф. дис. доктора с-х. наук: 06.01.03 / Леднев Андрей Викторович. – Ижевск, 2008. – 43 с.
21. Сулейманов Р. Р. Ферментативная активность и агрохимические свойства лугово-аллювиальной почвы в условиях нефтяного загрязнения / Р. Р. Сулейманов, Т. А. Абдрахманов, З. А. Жаббаров, Л. Т. Турсунов // Известия Самарского научного центра РАН. – 2008. – Т.10, №2. – С. 294-298.
22. Габбасова И. М. Деградация и рекультивация почв Башкортостана / И.М. Габбасова; под ред. Ф.Х. Хазиева. – Уфа: Гилем, 2004. – 284 с.
23. Щемелинина Т. Н. Биологическая активность нефтезагрязненных почв Крайнего севера на разных стадиях их восстановления и прирекультивации (на примере Усинского района Республики Коми): автореф. дис.канд. биол. наук: 03.00.27, 03.00.16 / Щемелинина Татьяна Николаевна. – Воронеж, 2008. – 24 с.
24. Ибрагимова С. Т. Биологическое диагностирование нефтезагрязненных почв месторождений Казахстана: автореферат дис. ... канд. биол. наук: 03.00.16 / Ибрагимова Самал Токмагамбетовна. – Алматы, 2009. – 18 с.
25. Назаров А. В. Влияние нефтяного загрязнения на бактерии дерновоподзолистой почвы / А. В. Назаров, Л. Н. Ананьина, О. В. Ястребова, Е. Г. Плотникова // Биология почв. – 2010. – № 12. – С. 1489-1493.
26. Медведева Е. И. Динамика восстановления нефтезагрязненных почв в условиях Среднего Поволжья / Е. И. Медведева // XII Пущинская школа-конференция молодых ученых «Биология - наука XXI века»: сборник тезисов. –Пущино, 2003 – С. 97.
27. Методика визначення збитку, обумовленого забрудненням і засміченням земельних ресурсів в результаті порушення природоохоронного законодавства / Міністерство охорони навколишнього природного середовища і ядерної безпеки, Київ. –1998.
28. Міхєєв О. М. Застосування рослинних тест-систем для оцінки комбінованої дії стресорів різної природи на екосистеми / О. М. Міхєєв, М. І. Гуца, Ю. В. Шиліна, Л. Г. Овсяннікова // Наук. праці. Екологія. – 2006. –53(40). –С. 56-64.
29. Демиденко А. Я. Пути восстановления плодородия нефтезагрязненных почв черноземной зоны Украины / А. Я. Демиденко, В. М. Демурджан // Восстановление нефтезагрязненных почвенных экосистем. М.: Наука, 1988. –С. 197-206.

30. Оливернусова Л. Оценка состояния окружающей среды методом комплексной биоиндикации / Л. Оливернусова // Биоиндикация и мониторинг. – М: Наука. – 1991. – С. 39-45.
31. Білик Т.І. Визначення фітотоксичності авіаційного палива із застосуванням рослинних тестерів / Т.І. Білик, І.Л. Трофімов, Г.М. Федорів, В.В. Боюк / Молодь і поступ біології: XII Міжнар. наук. конф., 19-21 квітня 2016 р., тези допов. – Львів, 2016. – С. 147-148.
32. Njoku K. L. Growth and performance of *Glycine max* L. (Merrill) in crude oil contaminated soil augmented with cow dung / K. L. Njoku, M. O. Akinola, B.O. Oboh // Nat. Sci. 2008. – 6(1). – P. 48-58.
33. Мирошниченко Н. Н. Принципы регламентации углеводородного загрязнения почв Украины / Н. Н. Мирошниченко // Почвоведение. – 2008. – №5. – С. 614-622.
34. Терехова В. А. Экотоксикологическая оценка повышенного содержания фосфора в почвогрунте по тест-реакциям растений на разных стадиях развития / В. А. Терехова, Д. Б. Домашнев, М. А. Канинский, А. В. Степачев // Проблемы агрохимии и экологии. – 2009. – №3. – С. 21-26.
35. Wang X., Sun C., Gao S., Wang L., Shuokui H. Validation of germination rate and root length as indicators to assess phytotoxicity with *Cucumis sativus* // Chemosphere, 2001, Vol. 44, F 8, p. 1711 - 1721.
36. Илларионов С. А. Роль микромицетов в фитотоксичности нефтезагрязненных почв / С. А. Илларионов, А. В. Назаров, И. Г. Калачникова // Экология. – 2003. – № 5. – С. 341-346.
37. Фомин Г. С. Почва. Контроль качества и экологической безопасности по международным стандартам / Г. С. Фомин, А. Г. Фомин. – Справочник. М: «Протектор», 2001. – 304 с.
38. Czerniawska-Kusza I. Comparison of the Phytotoxkit microbiotest and chemical variables for toxicity evaluation of sediments / I. Czerniawska-Kusza, T. Ciesielczuk, G. Kusza, A. Cichon // Environmental Toxicology. – 2006. – 21(4). – P. 367-372.
39. Киреева Н. А. Рост и развитие сорных растений в условиях техногенного загрязнения почвы / Н.А. Киреева, А.М. Мифтахова, Г.Г. Кузяхметов // Вестник Башкирского университета. – 2001. – №1. – С. 32-34.
40. Sharifi M. Germination and growth of six plant species on contaminated soil with spent oil / M. Sharifi, Y. Sadeghi, M. Akbarpour // Int. J. Environ. Sci. Tech. - 2007. - F 4 (4). – P. 463-470.
41. Blankenship D. W. Plant growth inhibition by the water extract of a crude oil / D. W. Blankenship R. A. Larson // Water, Air and Soil Pollut. – 1978. – Vol. 10, №4. – P. 471-472.
42. Blok C. Microbiotest to Assess the Phytotoxic Potential of Growing Media and Soils / C. Blok, G. Persoone, G. A Wever // Annual Symposium of the International Society of Horticultural Sciences. Book of Abstracts, Angers, France, 2005, poster.

I. Trofimov, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., **ORCID** 0000-0001-5539-1166
S. Boichenko, Dr. Eng. Sc., Prof., **ORCID** 0000-0002-2489-4980
O. Tykhenko, Cand. Sc. (Eng.), **ORCID** 0000-0001-6459-6497
I. Shkilniuk, **ORCID** 0000-0002-8808-3570
National Aviation University

ESTIMATION OF FITOTOXICITY OF MIXED AVIATION FUELS WITH APPLICATION OF PLANT TESTERS

In this article the problem of estimating phytotoxicity a mixture of aviation fuels with the use plant testers is considered.

Object of research - assessment of phytotoxicity mixed aviation fuels.

The main purpose of the work was to identify plant test objects pollution-sensitive blended aviation fuels in the early stages of germination. Establishing the relationship between the content of aviation fuel in the soil and the initial growth parameters of test plants, the establishment of a plant indicator pollution with mixed aviation fuel, which responds to low fuel content in the soil, at the level of approximately allowable concentration

Studies have made it possible to establish that the Lola Ross salad and the Rudolf radish are sensitive to the content of JETA-1 aviation fuel and JETA-1 blended aviation fuel biofuel in the early stages of germination in a wide range of concentrations of pollutant 0-20%. It was determined that in order to assess the toxicity of the measurement of the initial growth parameters of these plants, obtained on the 6th day of growth in the dark, is optimal. Plants: Peas, beans and cucumbers are not suitable for testing the toxicity of aviation fuel JETA-1 and mixed aviation fuel JETA-1 biofuels, since they died at the germination stage.

To obtain quantitative characteristics of the influence pollutants, we determined the relationship between the plant's response to the stress factor and the dose of the factor. We discovered that when adding JETA-1 aviation fuel with a concentration 50 ml, the length of the stem the Lola Ross salad and the Rudolf radish remained almost identical to the samples we drank in concentrations of 70x30 JETA-1 biofuels and decreased in comparison with

the samples that we were watering, concentrations of 50 ml of biofuel and 50 ml of a JETA-1-biofuel mixture of 50x50. In the case watering plants with a water concentration of 100 ml JETA-1, the inhibition of stem growth was more pronounced. Compared to samples that were water-saturated with 100 ml water JETA-1 biofuel (70x30) and 100 ml water samples, JETA-1 had twice the height of the stem compared to the samples, foamed with water concentrations of 100 ml of biofuels and 100 ml of JETA-1- kerosene (50x50). Plants, watered with a concentration of 100 ml JETA-1, had 4-6 times less stem height. As a result of the experiments, the specificity and sensitivity phytotems (*Lola Ross salad* and *Rudolf radish*) were revealed, indicating the possibility of their use for assessing the toxicity of oil contaminated soils.

The results of this work can be used to assess the phytotoxicity both mixed and traditional aviation fuels with the use of plant testers at storage sites for aviation fuels during their operation (aviation fuel supply, fuel depots, petroleum storage depots). Also, research results can be used by environmental specialists in the field of environmental protection and specialists in the field exploitation storage facilities for motor fuels.

Foreseeable assumptions about the development of the research object are the search and establishment of more sensitive and cheap phytotems with the possibility of their use for assessing the toxicity of oil contaminated soils.

Key words: toxicity, biotesters, plants, aviation fuel, biological fuel, soil, phyto-testers, indicators, pollutants.

References

1. Bubnov A. G. Biotestovyy analiz – integralnyy metod otsenki kachestva obektov okruzhayushchey sredy: uch.-metod. posobiye / [A. G. Bubnov, S. A. Buymova, A. A. Gushchin i dr.]; pod obshch. red. V. I. Grinevicha; Ivan. gos. khim. – tekhnol. un-t. – Ivanovo. 2007. – 112 s.
2. Vasilev A. V. Ekologicheskii monitoring toksicheskogo zagryazneniya pochvy nefteproduktami s ispolzovaniyem metodov biotestirovaniya [Elektronnyy resurs] / A. V. Vasilev, V. V. Zabolotskikh, O. V. Tupitsyna, A. M. Shterenberg // Neftegazovoe delo. – 2012. – №4. – S. 242 – 249. Rezhim dostupa: URL:http://ogbus.ru/authors/VasilyevAV/VasilyevAV_1.pdf.
3. Mayachkina N. V. Osobennosti biotestirovaniya pochv s tselyu ikh ekotoksikologicheskoy otsenki / N. V. Mayachkina, M. V. Chugunov // Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N. I. Lobachevskogo. – 2009. – № 1. – S. 84-93.
4. Saksonov M. N. Ekologicheskii monitoring neftegazovoy otrasli. Fiziko-khimicheskiye i biologicheskiye metody: ucheb. posobiye / M. N. Saksonov, A. D. Abalakov, L. V. Danko, O. A. Barkhatova, A. E. Balayan, D. I. Stom. – Irkutsk: Irkut. un-t. 2005. – 114 s.
5. Shevchyk L.Z. Ekolohichna otsinka ta fitoremediatsiia naftozabrudnenykh gruntiv / L.Z. Shevchyk // Dysertatsiia na zdobuttia naukovooho stupenia kandydata biolohichnykh nauk. – Lviv 2017. Rezhym dostupu: URL: http://www.dnu.dp.ua/docs/ndc/dissertations/D08.051.04/dissertation_5902f7c3b8f84.pdf.
6. Kireeva N. A. Aktivnost karbogidraz v neftezagryaznennykh pochvakh / N. A. Kireeva, N. I. Novoselova, F. Kh. Khaziyev // Pochvovedeniye. – 1998. № 12. – S. 1444-1448.
7. Kozlov K. S. Vliyaniye zagryazneniya pochvy nefteproduktami na dozhdevykh chervey: avtoref. dis. ... kand. biol. nauk: 03.00.16 / K. S. Kozlov. – Tomsk. 2003. – 13s.
8. Loginov O. N. Biotekhnologicheskii metody ochistki okruzhayushchey sredy ot tekhnogennykh zagryazneniy / Loginov O. N., Silishchev N. N., Boyko T. F., Galimzyanova N. F. – Ufa: Gosudarstvennoe izdatelstvo nauchno-tekhnicheskoy literatury «Reaktiv». – 2000. – 100 s.
9. Shamrayev A. V. Vliyaniye neftiinefteproduktov na razlichnye komponenty okruzhayushchey sredy / A. V. Shamrayev, T. S. Shorina // Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta. – 2009. – № 6(100). – S. 642-645.
10. Suleymanov R. R. Izmeneniye bufernosti pochv pri zagryaznenii neftepromyslovymi vodami i syroy neftyu / R. R. Suleymanov, F. I. Nazyrova // Vestnik OGU. – 2007. – №4. – S. 133-139.
11. Karalov A. M. Regulirovaniye teplovogo rezhima neftezagryaznen-nykh zemel v usloviyakh ikh biologicheskoy rekultivatsii / A. M. Karalov // VIII vsesoyuz. sezd pochvovedov: tezisy dokladov. Kn. 1. - Novosibirsk. 1989. – S. 37.
12. Babadzhanova O. F. Migratsiya nafti i naftoproduktiv u poverkhnevi shari rruntu pri avariynikh rozlivakh / O. F. Babadzhanova, N. M. Grinchishin, Yu. G. Sukach // Bezpekazhittya i diyalnosti lyudini - osvita. nauka. praktika: zb.nauk. prats X mizhnar. nauk.-metod. konf. – K.: Natsionalnyi aviatsiyniy universitet, 2011. – S. 22-26.
13. Elin E. S. Biogeokhimicheskaya transformatsiya nefiti-zagryaznitelya I bolotnogo biogeotsenoza pri ikh vzaimodeystvii / E. S. Elin // Vestnik ekologii, lesovedeniya i landshaftovedeniya. – Tyumen: Izd-vo IPOSSORAN. 2002. – F 3. – S. 153-166.
14. Sikkema J. Mechanisms of Membrane Toxicity of Hydrocarbons / J. Sikkema, A. M. de Bont, B. Poolman // Microbiological REVIEWS. – 1995. – Vol. 59, F 2. – P. 201-222.
15. Tyuleneva V. A. K voprosu issledovaniya filtratsii nefiti v pochvakh / V. A. Tyuleneva, V. A. Solyanik, I. V. Vaskina // Visnik KDPU. – 2006. – Vip. 2/2006 (37). ch. 2. – S. 110-112.

16. Beznosikov V. A. Ekologicheskaya otsenka pochvv rayone ekspluatatsii neftyanykh mestorozhdeniy v usloviyakh Severa / V. A. Beznosikov, E. D. Lodygin, B. M. Kondratenok // Mezhdunarodnyy ekologicheskiiy forum «Sokhranim planetu Zemlya»: sbornik dokladov. – SPb.: Tsentralnyy muzey pochvovedeniya im. V. V. Dokuchayeva. 2004. – S. 144-148.
17. Novoselova E. I. Ekologicheskiiy easpekty transformatsii fermentativnogo mula pochvy pri neftyanom zagryaznenii I rekultivatsii: atoref. dis. . dok. biol. nauk / Novoselova Evdokiya Ivanovna. – Voronezh: VGU. 2008. – 42 s.
18. Kabirov R. R. Otsenka biologicheskoy aktivnosti neftezagryaznennykh pochv s pomoshchyu integralnogo pokazatelya / R. R. Kabirov, N. A. Kireeva, T. R. Kabirov, I. E. Dubovik, A. B. Yakupova, L. M. Safiullina // Pochvovedeniye. – 2012. – №2. – S. 184-188.
19. Aliyev I. N. Estestvennoe obleseniye i biologicheskaya rekultivatsiya narushennykh zemel severnogo Kavkaza (naprimere Kabardino-Balkarii): avtoref. dis. dok. s.-kh. n.: 06.03.01 / Aliyev Igor Nazhafovich. – Volgograd. 2012. – 42 s.
20. Lednev A. V. Izmeneniye svoystv dernovo-podzolistykh suglinistykh pochv pod deystviyem zagryazneniya produktami neftedobychi i priyemy ikh rekultivatsii: avtoref. dis. doktoras-kh. nauk: 06.01.03 / Lednev Andrey Viktorovich. – Izhevsk. 2008. – 43 s.
21. Suleymanov R. R. Fermentativnaya aktivnost i agrokhimicheskiye svoystva lugovo-allyuvialnoy pochvy v usloviyakh neftyanogo zagryazneniya / R. R. Suleymanov, T. A. Abdrakhmanov, Z. A. Zhabbarov, L. T. Tursunov // Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN. – 2008. – T.10. №2. – S. 294-298.
22. Gabbasova I. M. Degradatsiya i rekultivatsiya pochv Bashkortostana / I.M. Gabbasova; pod red. F.Kh. Khaziyeva. – Ufa: Gilem. 2004. – 284 s.
23. Shchemelinina T. N. Biologicheskaya aktivnost neftezagryaznennykh pochv Kraynego severa na raznykh stadiyakh ikh vosstanovleniya i prirekultivatsii (naprimere Usinskogo rayona Respubliki Komi): avtoref. dis. kand. biol. nauk: 03.00.27. 03.00.16 / Shchemelinina Tatiana Nikolayevna. – Voronezh. 2008. – 24 s.
24. Ibragimova S. T. Biologicheskoe diagnostirovaniye neftezagryaznennykh pochv mestorozhdeniy Kazakhstana: avtoreferatdis. ... kand. biol. nauk: 03.00.16 / Ibragimova Samal Tokmagambetovna. – Almaty. 2009. – 18 s.
25. Nazarov A. V. Vliyaniye neftyanogo zagryazneniya na bakterii dernovopodzolistoy pochvy / A. V. Nazarov, L. N. Ananina, O. V. Yastrebova, E. G. Plotnikova // Biologiyapochv. – 2010. – № 12. – S. 1489-1493.
26. Medvedeva E. I. Dinamika vosstanovleniya neftezagryaznennykh pochv v usloviyakh Srednego Povolzhia / E. I. Medvedeva // XII Pushchinskaya shkola-konferentsiya molodykh uchenykh «Biologiya – nauka XXI veka»: sbornik tezisev. – Pushchino. 2003 – S. 97.
27. Metodika viznachennya zbitku obumovlenogo zabrudnennyam i zasmichennyam zemelnikh resursiv v rezultati porushennya prirodokhoronnogo zakonodavstva / Ministerstvo okhoroni navkolishnogo prirodnoho seredovishcha i yadernoї bezpeki. Kiiv. – 1998.
28. Mikheev O. M. Zastosuvannya roslinnikh test-sistem dlya otsinki kombinovanoї diї stresoriv riznoi prirodi na ekosistemi / O. M. Mikheev, M. I. Gushcha, Yu. V. Shilina, L. G. Ovsyannikova // Nauk. pratsi. Ekologiya. – 2006. – 53(40). – S. 56-64.
29. Demidenko A. Ya. Puti vosstanovleniya plodorodiya neftezagryaznen-nykh pochv chernozemnoy zony Ukrainy / A. Ya. Demidenko, V. M. Demurdzhan // Vosstanovleniye neftezagryaznennykh pochvennykh ekosistem. M.: Nauka. 1988. – S. 197-206.
30. Olivernusova L. Otsenka sostoyaniya okruzhayushchey sredy metodom kompleksnoy bioindikatsii / L. Olivernusova // Bioindikatsiya I monitoring. – M: Nauka. – 1991. – S. 39-45.
31. Bilyk T.I. Vyznachennia fitotoksychnosti aviatsiinoho palyva iz zastosuvanniam roslynnykh testeriv / T.I. Bilyk, I.L. Trofimov, H.M. Fedoriv, V.V. Boiuk / Molod i postup biolohii: XII Mizhnar. nauk. konf., 19-21 kvitnia 2016 r., tezy dopov. – Lviv, 2016. – S. 147-148.
32. Njoku K. L. Growth and performance of *Glycine max* L. (Merrill) in crude oil contaminated soil augmented with cow dung / K. L. Njoku, M. O. Akinola, B.O. Oboh // Nat. Sci. 2008. – 6(1). – P. 48-58.
33. Miroshnichenko N. N. Printsipy reglamentatsii uglevodorodnogo zagryazneniya pochv Ukrainy / N. N. Miroshnichenko // Pochvovedeniye. – 2008. – №5. – S. 614-622.
34. Terekhova V. A. Ekotoksikologicheskaya otsenka povyshennogo sodержaniya fosfora v pochvogrunte po test-reaksiyam rasteniy na raznykh stadiyakh razvitiya / V. A. Terekhova, D. B. Domashnev, M. A. Kaniskin, A. V. Stepachev // Problemy agrokhimii i ekologii. – 2009. – № 3. – C. 21-26.
35. Wang X., Sun C., Gao S., Wang L., Shuokui H. Validation of germination rate and root elongation as indicator to assess phytotoxicity with *Cucumis sativus* // Chemosphere, 2001, Vol. 44, F 8, p. 1711 - 1721.
36. Illarionov S. A. Rol mikromitsetov v fitotoksichnosti neftezanryaznennykh pochv / S. A. Illarionov. A. V. Nazarov. I. G. Kalachnikova // Ekologiya. – 2003. – № 5. – S. 341-346.
37. Fomin G. S. Pochva. Kontrol kachestva i ekologicheskoy bezopasnosti po mezhdunarodnym standartam / G. S. Fomin. A. G. Fomin. – Spravochnik. M: «Protektor». 2001. - 304 s.

38. Czerniawska-Kusza I. Comparison of the Phytotoxkit microbiotest and chemical variables for toxicity evaluation of sediments / I. Czerniawska-Kusza, T. Ciesielczuk, G. Kusza, A. Cichon // *Environmental Toxicology*. – 2006. – 21(4). – P. 367-372.
39. Kireeva N. A. Rost i razvitiye sornykh rasteniy v usloviyakh tekhnogennoho zagryazneniya pochvy / N.A. Kireeva, A.M. Miftakhova, G.G. Kuzyakhmetov // *Vestnik Bashkirskogo universiteta*. – 2001. – №1. – S. 32-34.
40. Sharifi M. Germination and growth of six plant species on contaminated soil with spent oil / M. Sharifi, Y. Sadeghi, M. Akbarpour // *Int. J. Environ. Sci. Tech.* - 2007. - F 4 (4). – P. 463-470.
41. Blankenship D. W. Plant growth inhibition by the water extract of a crude oil / D. W. Blankenship R. A. Larson // *Water, Air and Soil Pollut.* – 1978. –Vol. 10, №4. – P. 471-472.
42. Blok C. Microbiotest to Assess the Phytotoxic Potential of Growing Media and Soils / C. Blok, G. Persoone, G. A Wever // *Annual Symposium of the International Society of Horticultural Sciences. Book of Abstracts, Angers, France, 2005, poster.*

УДК 504.53.054 (045)

И.Л. Трофимов, канд. техн. наук, доц., ORCID 0000-0001-5539-1166

С.В. Бойченко, д-р. техн. наук, проф., ORCID 0000-0002-2489-4980

О.Н. Тихенко, канд. техн. наук, ORCID 0000-0001-6459-6497

И.А. Шкильнюк, ORCID 0000-0002-8808-3570

Национальный авиационный университет

ОЦЕНКА ФИТОТОКСИЧНОСТИ СМЕСЕВОГО АВИАЦИОННОГО ТОПЛИВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАСТИТЕЛЬНЫХ ТЕСТЕРОВ

В данной статье рассматривается проблема оценки фитотоксичности смеси авиационных топлив с использованием тестеров растений.

Объект исследования - оценка фитотоксичности смешанных авиационных топлив.

Основная цель работы заключалась в том, чтобы идентифицировать объекты испытаний на заводе, чувствительные к загрязнению, смешанные авиационные топлива на ранних стадиях прорастания. Установление взаимосвязи между содержанием авиационного топлива в почве и начальными параметрами роста испытательных установок, установление индикатора загрязнения завода смешанным авиационным топливом, которое реагирует на низкое содержание топлива в почве, на уровне приблизительно допустимой концентрации

Исследования позволили установить, что салат «Лола Росс» и редька Рудольфа чувствительны к содержанию авиационного топлива JETA-1 и смешанного биотоплива JETA-1 с биотопливом на ранних стадиях прорастания в широком диапазоне концентраций загрязняющих веществ 0 -20%. Было установлено, что для оценки токсичности измерения начальных параметров роста этих растений, полученных на 6-й день роста в темноте, является оптимальным. Растения: Горох, фасоль и огурцы не подходят для тестирования токсичности биотоплива JETA-1 для авиационного топлива JETA-1 и смешанного авиационного топлива, поскольку они погибли на стадии прорастания.

Чтобы получить количественные характеристики влияния загрязняющих веществ, мы определили взаимосвязь между ответом растения на фактор стресса и дозой фактора. Мы обнаружили, что при добавлении авиационного топлива JETA-1 с концентрацией 50 мл длина ствола салата Lola Ross и редьки Rudolf оставалась почти идентичной образцам, которые мы пили в концентрациях биотоплива JETA-1 70x30 и уменьшались по сравнению с образцы, которые мы поливали, концентрации 50 мл биотоплива и 50 мл смеси JETA-1-биотоплива 50x50. В случае полива растений с концентрацией воды в 100 мл JETA-1 ингибирование роста стебля было более выраженным. По сравнению с образцами, которые были насыщены водой 100 мл воды JETA-1 биотоплива (70x30) и 100 мл образцов воды, JETA-1 в два раза превышала высоту ствола по сравнению с образцами, вспенивалась с концентрациями воды в 100 мл биотоплива и 100 мл JETA-1-керосина (50 x 50). Растения, политые с концентрацией 100 мл JETA-1, имели в 4-6 раз меньше высоты стебля. В результате экспериментов были выявлены фитотомы специфичности и чувствительности (салат Лола Росс и редька Рудольфа), что указывает на возможность их использования для оценки токсичности загрязненных нефтью почв.

Результаты этой работы могут быть использованы для оценки фитотоксичности как смешанного, так и традиционного авиационного топлива с использованием тестеров растений на площадках хранения для авиационного топлива во время их эксплуатации (поставки авиационного топлива, хранилища топлива, нефтебазы). Кроме того, результаты исследований могут быть

использованы специалистами по охране окружающей среды в области охраны окружающей среды и специалистами в области эксплуатации месторождений для моторных топлив.

Предвидимыми предположениями о развитии объекта исследования являются поиск и создание более чувствительных и дешевых фитотомов с возможностью их использования для оценки токсичности загрязненных нефтью почв.

Ключевые слова: токсичность, биотестеры, растения, авиационное топливо, биологическое топливо, почва, фито-тестеры, индикаторы, загрязнители.

Надійшла 17.06.2018

Received 17.06.2018

УДК 504/510

І. О. Рабош, аспірант ORCID 0000-0001-6863-3945

О. В. Кофанова, д-р. пед. наук, канд. хім. наук, проф., ORCID 0000-0002-9851-6392

А. В. Підгорний, канд. хім. наук, доц., ORCID 0000-0002-4041-1053

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ВИВЧЕННЯ ЗАБРУДНЕННЯ УРБАНОЗЕМІВ ОБ'ЄКТАМИ АВТОТРАНСПОРТНОГО КОМПЛЕКСУ

Вивчено вплив автотранспортного комплексу на ґрунтовий покрив прилеглих до автомагістралей територій у м. Києві. Актуальність роботи визначається збільшенням техногенного навантаження на навколишнє середовище внаслідок зростання потоків автотранспортних засобів на автомагістралях міста. За результатами хімічного аналізу водних ґрунтових витяжок встановлено, що на ґрунти негативно чинять вплив об'єкти транспортної інфраструктури, що приводить до зміни їх хімічного складу. Визначено водневий показник рН (актуальна кислотність) водних витяжок ґрунту, сульфатно-хлоридний вміст, наявність основних катіонів та аніонів. За величиною кислотності та сульфатно-хлоридним вмістом встановлено показник забруднення територій поблизу досліджуваних об'єктів АТК.

Ключові слова: автотранспортний комплекс, екологічна безпека, шкідливі речовини, педосфера, ґрунтові витяжки, фізико-хімічний аналіз.

Вступ. Екологічна безпека є однією зі складових національної безпеки країни та спрямована на створення надійних умов життєдіяльності людини і функціонування екосистем. Автотранспортний комплекс (АТК) чинить різноманітні хімічні, механічні та фізичні дії на всі підсистеми навколишнього середовища, що обумовлено невідпинним споживанням природних ресурсів, забрудненням атмосфери і педосфери шкідливими речовинами (ШР), створенням високих рівнів шуму та вібрацій, руйнуванням ґрунтово-рослинного покриву тощо. Забруднення міського середовища ШР, зокрема оксидами Карбону, Нітрогену, Сульфуру, аміаком, бенз(а)піреном, формальдегідом, бензолом тощо, важкими металами та зваженими речовинами (РМ) виходить за межі локального впливу, що призводить до зміни структурних, функціональних особливостей урбоекосистем [1]. Зокрема, існує ризик аномального забруднення ґрунтово-рослинного покриву поблизу об'єктів АТК та приміагістральних зон дрібнодисперсним пилом, солями, незгорілими вуглеводнями, що веде до деградації значних площ територій міста.

Постановка проблеми. За рахунок постійного зростання кількості автотранспортних засобів (АТЗ), особливо приватних, збільшується число об'єктів автотранспортної інфраструктури. Така ситуація веде до щільного заповнення території міста об'єктами АТК, до яких входять автозаправні станції (АЗС), автомийні комплекси, автостоянки, сервіси автообслуговування тощо. Як наслідок, поряд з ними

формуються зони підвищених концентрацій ШР як в приземному шарі атмосфери, так і в ґрунтово-рослинному покриві.

Основними чинниками інтенсивного забруднення є високий розвиток інфраструктури АТК, експлуатація технічно застарілого автомобільного парку, незадовільна якість паливно-мастильних матеріалів, недостатнє озеленення міст тощо. На геохімічний стан території міста впливають тип та щільність міської забудови, кліматичні умови, розташування і завантаженість дорожньо-вуличної мережі. Разом з цим кількість утворених ШР залежить від організації дорожнього руху, особливостей розподілу автотранспортних потоків, зносу дорожнього покриття, шин, гальмівних механізмів. Погіршує ситуацію велика кількість маршрутних таксі та автобусів, що старші 20 років. В Україні до цього часу законодавчо не регламентується термін експлуатації рухомого складу, що призводить до того, що багато АТЗ не відповідають чинним екологічним нормам. Отже, оцінка впливу АТК на навколишнє середовище, прогнозування наслідків техногенного забруднення на здоров'я людей, розробка заходів для попередження і дезактивації потрапляння ШР в компоненти екосистеми залишаються важливими і актуальними науково-практичними завданнями.

Аналіз останніх досліджень. Аналіз наукових джерел показав, що проблема забруднення навколишнього середовища АТК гостро стоїть як за кордоном [2, 3], так і в Україні [4, 5]. Встановлено, що найбільш чутливим до поглинання ШР є приземний шар атмосфери, саме в ньому зосереджено до 80% маси усієї атмосфери та 99% водяної пари [1, 6]. В цьому просторі безпосередньо відбуваються викиди ШР, їх розсіювання, змішування, транспортування, хімічні перетворення й осадження (сухе та мокре) на поверхні рослинного, ґрунтового та іншого покривів. Від часу перебування в приземному шарі та перебігу різноманітних хімічних реакцій залежить відстань перенесення ШР та їх осадження на поверхню, а значить, і формування зон локальних забруднення [7]. Дерева, кущові насадження, житлові будинки тощо суттєво знижують ступінь забруднення атмосфери [8], проте створюють іншу екологічну небезпеку надмірного накопичення ШР на певних територіях. При цьому аерозольні та пилові частинки осідають на рослинах, акумулюються їх тканинами, а потім вимиваються опадами, поглинаються верхніми шарами ґрунту, потрапляючи у ґрунтові та поверхневі води.

Часова і просторова динаміка акумуляції та міграції ШР у ґрунтовому покриві визначається як їх хімічним складом, так і фізико-хімічними особливостями ґрунтів [9]. Ці речовини уже на рівні ~15% заповнюють поровий простір, склеюють ґрунтові агрегати, змінюючи механічну структуру і порушуючи водно-повітряний режим ґрунту. Надмірні концентрації токсикантів у ґрунті призводять до зменшення рухомих форм Калію, Фосфору, Нітрогену, обмінних катіонів та величини ємності катіонного обміну. Це спричинює зміну фракційного складу гумусу, зниження кількості гумінових кислот, підвищення частки негідролізованого залишку та загального вмісту органічного Карбону. У свою чергу, збільшення мінералізації ґрунтового покриву загрожує вторинному засоленню земель [10]. Існує також загроза для біотичної складової ґрунтової екосистеми. При цьому особливу роль відіграє кількість біодоступних сполук – рухливих форм токсикантів, а не їх валовий вміст. Загальновідомо, що ступінь міцності зв'язку токсикантів у ґрунті та їх рухливість залежить від кислотності, гранулометричного і мінералогічного складу, гумусового стану тощо. Наразі швидкість накопичення ШР в урбаноземах значно перевищує здатність ґрунтового покриву до самоочищення.

Таким чином, потік ШР від автотранспорту та об'єктів інфраструктури АТК утворюється на незначній висоті над землею, осідає на ґрунтах, рослинах, сніговому покриві взимку та сприяє локалізації забрунювачів на прилеглих до АТК територіях. У праці [11] за аналізом стану снігового покриву території АЗС, що розташована поблизу потужної автомагістралі, виявлено стійкий високий рівень забруднення снігового покриву сульфатами, гідрокарбонатами, гідросульфатами та хлоридами, що суттєво впливає на кислотність ґрунту навесні. Великі кількості РМ обумовлені застосуванням протижелезних засобів і деякою мірою механічним виносом компонентів дорожнього покриття і твердих частинок зі складу автопокришок (до яких входять Цинк, Нікель, Купрум, Ванадій, Молібден, Плюмбум та Хром, сажа, каучук тощо). Отже, дослідження процесів надходження, механізмів накопичення і міграції ШР до педосфери під впливом АТК є важливим для комплексної екологічної оцінки стану високо урбанізованої території.

Метою роботи є оцінка геоекологічного стану території АТК м. Києва за допомогою аналізу водних ґрунтових витяжок та вивчення шляхів потрапляння ШР до компонентів урбоекосистем.

Викладення основного матеріалу.

На рівень викидів ШП поблизу об'єктів АТК впливає структура автопарку, його розподіл за типом АТЗ і роком їх випуску, технічним станом тощо. При цьому загальна кількість АТЗ в Україні постійно зростає, росте й частка приватного автотранспорту (рис. 1) [12].



Рисунок 1 – Тенденції загальної кількості автопарку України до 2018 р. (Ukraine SRTRI)

Під час підготовки до участі в 21-й Конференції країн-учасниць конвенції, що відбулась у Парижі в грудні 2015 року, Україна взяла на себе зобов'язання не перевищити у 2030 році 60% рівня викидів ШП станом на базовий 1990 рік. При цьому викиди ШП в атмосферне повітря АТК упродовж останніх років становлять близько 1796,5 млн. т щорічно (90% від загального обсягу викидів в Україні. Відсотковий склад викидів від автотранспорту за основними ШП наведено на діаграмі (рис. 2) [13].

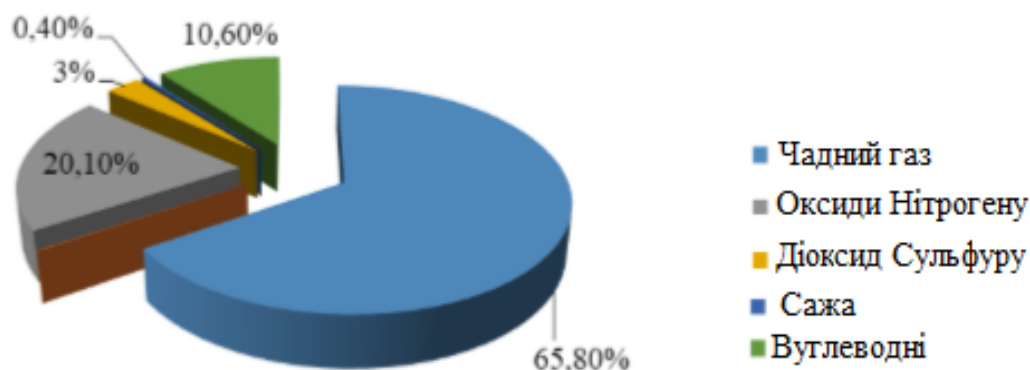


Рисунок 2 – Викиди ШП автотранспортом в Україні (2016 р.)

Як зазначалося, значна частка ШП від працюючих АТЗ потрапляє у ґрунт, який є специфічним геохімічним бар'єром на шляху міграції токсикантів.

Для дослідження стану ґрунтів на території м. Києва застосовували еколого-геохімічний підхід. Відомо, що рівень забруднення ґрунтів залежить від якісних і кількісних показників. До першої групи чинників відносимо якісний хімічний склад ШП, клас небезпеки, ступінь токсичності, характер трансформації, водний режим, генетичний профіль ґрунту тощо. Другу групу показників складають кількісні характеристики ШП (обсяги РМ та їх розміри, кількості солей слабких кислот, важких металів, вуглеводнів тощо) та показники ґрунту. Ці параметри безпосередньо пов'язані з фізико-хімічними

властивостями ґрунту і показниками зовнішнього середовища (окисно-відновний потенціал, водневий показник рН, температура, вологість, пористість ґрунту та кількість опадів).

Педохімічні дослідження проводили на ділянках інтенсивного надходження ШР в навколишнє середовище. Це ділянки, що розташовані поблизу АЗС (особливо разом з СТО, автомийними комплексами, шиномонтажним сервісом, автостоянками, прилягаючими до автомагістралі). Саме в цих зонах відбувається скупчення АТЗ, додаткові затори руху, часті гальмування автотранспорту тощо. Тут спостерігаються різні режими руху АТЗ: робота двигуна в режимі мінімальної частоти обертання, холодного ходу, рушання з місця, розгін, рух з усталеною швидкістю, перемикання передач тощо. Залежно від режиму руху АТЗ у навколишнє середовище потрапляють різні кількості ШР. Як видно з діаграми (рис. 3), найбільша кількість викидів ШР (60...64%) приходить на режим розгону. Викиди СО в режимі розгону складають ~64%, в режимі холодного ходу ~28% і є значно меншими в режимі усталеного руху (7%) [14]. Виходячи з вище сказаного обумовлений вибір досліджуваних ділянок.

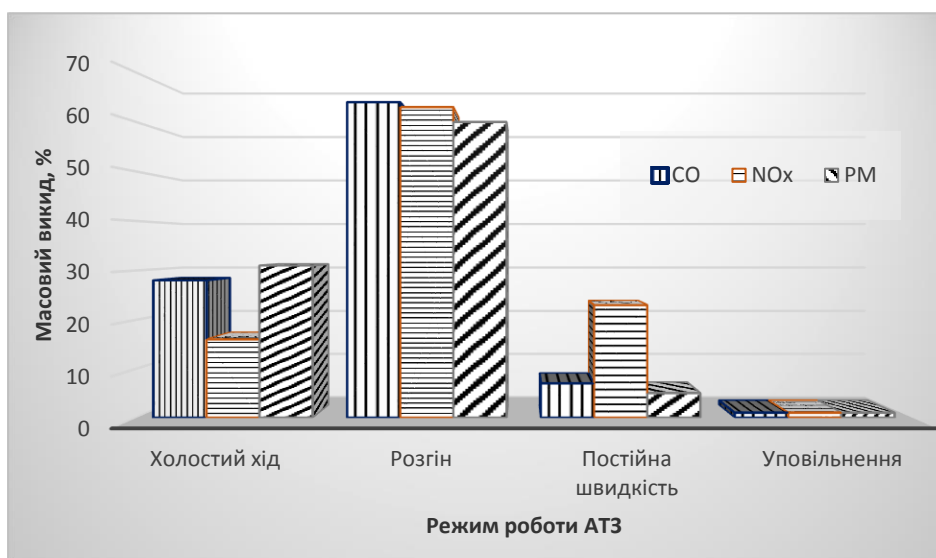


Рисунок 3 – Масовий викид ШР в залежності від режиму руху АТЗ

На даний момент у Києві функціонує величезна кількість об'єктів АТК, котрі розміщуються по всій території міста – в районах житлової забудови, проїздах, всередині кварталів і пішохідних вулиць, становлячи загрозу забруднення повітряного і ґрунтового середовища. Тому як об'єкти дослідження обрано ділянки поблизу АЗС, автомийок, автостоянок, шиномонтажного сервісу, що знаходяться вздовж швидкісної автомагістралі.

Відбір зразків ґрунту відбувався навесні за адресами: просп. Космонавта Комарова, 1/3, Amic Energy; просп. Космонавта Комарова, 42, Shell; просп. Космонавта Комарова, 5, Shell; просп. Леся Курбаса, 1а/1, ОККО; просп. Леся Курбаса, 2в, БРСМ-Нафта; просп. Леся Курбаса, 2ж, ОККО; просп. Космонавта Комарова, станція Героїв Севастополя, СТО, бульвар Вацлава Гавела, 10, СТО Киев-Авто-Сервис; просп. Леся Курбаса, 1а/3, ОККО та на фоновій території (Житомирська обл., Олевський р-н, проба № 10). Зразки відбиралися за стандартним методом конверту – з кутів і центральної частини квадрату розміром 2x2 м з поверхневого горизонту до глибини 15 см відповідно до вимог ДСТУ 4287:2004 та маркувалися відповідно точок відбору проб. Далі зразки висушували, вилучали сторонні включення, розтирали у порцеляновій ступці та просіювали через сито з діаметром отворів 1 мм. Для приготування водної ґрунтової витяжки 100 г підготовленого повітряно-сухого ґрунту поміщали в колби, додавали 500 мл дистильованої води, перемішували впродовж 10–20 хв і залишали у темному прохолодному місці на 24 год, а потім фільтрували через паперовий складчастий фільтр. Визначення проводили одразу після фільтрування ґрунтового розчину.

рН ґрунтової витяжки визначали потенціометричним методом з використанням потенціометра (іономера), відкаліброваного в одиницях рН, при температурі $20 \pm 0,05^\circ\text{C}$ [17]. Як електрод порівняння використовували хлорсрібний електрод. Калібрування рН-метру проводилось за 5-ма буферними розчинами, що охоплюють усю досліджувану область значень рН (1,68; 3,56; 4,01; 6,86; 9,18). Отримані експериментальні дані подано на рис. 4.

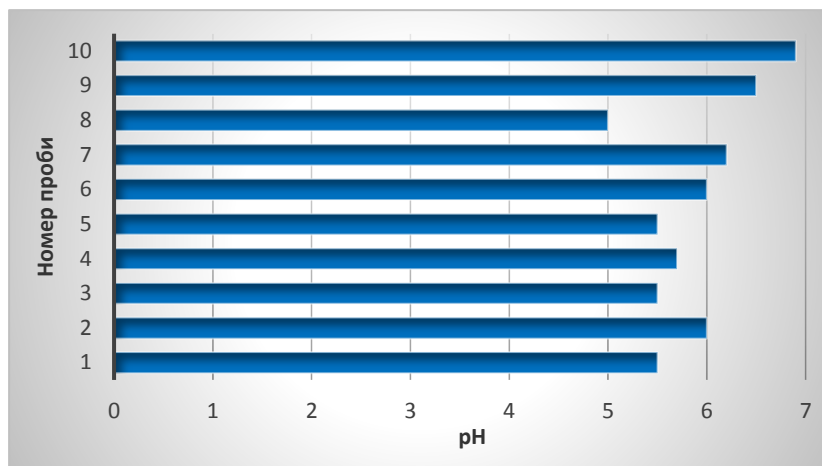
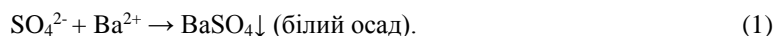


Рисунок 4 - Водневий показник рН (актуальна кислотність) водних витяжок ґрунту у досліджуваних точках

Якісний аналіз водних ґрунтових витяжок на наявність аніонів SO_4^{2-} , Cl^- , CO_3^{2-} , PO_4^{3-} , S^{2-} та катіонів NH_4^+ , Pb^{2+} , Zn^{2+} , Cu^{2+} , Hg^{2+} , Co^{2+} , Ni^{2+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} проводили за тест-реакціями [15].

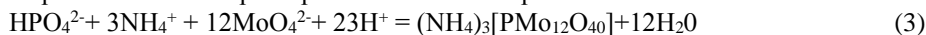
При визначенні іонів SO_4^{2-} за реакцією (1) їх осаджували іонами Барію в кислому середовищі ($\text{pH} \approx 5$):



Виявлення іонів Cl^- проводили за допомогою розчину нітрату Аргентуму AgNO_3 у присутності нітратної кислоти (реакція (2)). Тест вважали позитивним, якщо внаслідок взаємодії утворювався характерний сіруватий творожистий осад хлориду Аргентуму:



Для встановлення наявності фосфат-іонів застосовували реакцію (3) з молібдатом амонію у кислому середовищі. Наявність іонів підтверджується, якщо внаслідок реакції утворюється сіль фосфорно-молібденової гетерополікислоти характерного жовтого забарвлення:



Для всіх досліджуваних нами проб ґрунтових розчинів зазначена реакція не дала позитивного результату. Проте оскільки цей тест характерний тільки для ортофосфатів, а поліфосфати й естери фосфорних кислот з молібдатом амонію не реагують, то остаточний висновок щодо наявності чи відсутності сполук Фосфору у досліджуваних зразках залишається відкритим.

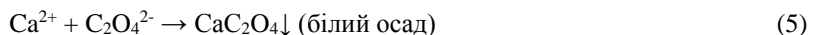
Для виявлення вмісту катіонів важких металів (Me^{2+}) Плюмбуму Pb^{2+} , Цинку Zn^{2+} , Купруму Cu^{2+} , Меркурію Hg^{2+} , Кобальту Co^{2+} , Ніколу Ni^{2+} проводили реакції з розчином Na_2S і спостерігали за утворенням забарвлених осадів за реакціями виду (4):



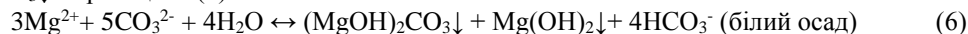
Не спостерігалось утворення осадів (чорного кольору сульфідів Плюмбуму PbS , Купруму CuS та Меркурію HgS , жовтого осаду сульфиду Кадмію CdS та білого осаду сульфиду Цинку). Оскільки даний тест на досліджувані іони показав негативний результат, то вважаємо також сульфід-іони S^{2-} відсутніми.

Визначення катіонів Fe^{3+} за реакцією з роданідом Калію також не дала позитивного результату. Присутність катіонів NH_4^+ також не було встановлено, оскільки нагрівання проб з розчином NaOH не супроводжувалось виділенням аміаку.

Вміст катіонів Ca^{2+} і Mg^{2+} виявлений у всіх досліджуваних зразках, оскільки при додаванні оксалату натрію $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$ за реакцією (5) спостерігалось утворення білого осаду $\text{CaC}_2\text{O}_4 \downarrow$, нерозчинного в ацетатній кислоті:



При додаванні K_2CO_3 до нагрітих ґрунтових розчинів спостерігали утворення білого осаду суміші $\text{MgCO}_3 \downarrow$ та $(\text{MgOH})_2\text{CO}_3 \downarrow$ за реакцією (6):



Для визначення вмісту нітрат-іонів NO_3^- використовували розчин дифеніламіну (ДА). На скляну пластинку наносили декілька крапель ДА і додавали по краплинам досліджувані проби водних витяжок. Тест-реакція показала негативний результат – утворення виразних синіх контурів на склі не спостерігалось.

Отже, за результатами якісного аналізу вдалося встановити наявність катіонів Кальцію та Магнію (проби 1-10), хлорид-іонів (проби 1, 3, 5, 7) та сульфат-іонів (проби 2, 7). Кількісне визначення вмісту у пробах катіонів Кальцію і Магнію (а саме вони зумовлюють утворення сульфатів і хлоридів Кальцію та Магнію CaCl_2 , CaSO_4 , MgCl_2 , MgSO_4) проводили титриметричним методом у лужному середовищі ($\text{pH} \approx 10$). У конічну колбу вміщували 25 мл ґрунтового розчину, додавали 2-3 мл буферного розчину і титрували розчином трилону Б до переходу червоного забарвлення в синє [15]. Розрахунок проводили за формулою:

$$T = (c_B \times V_B / V_B) * 1000 \quad (7)$$

де c_B – молярна концентрація еквіваленту Трилону Б у розчині (0,02 моль/л); V_B – середнє значення об'єму розчину Трилону Б, що було витрачено на титрування, мл; V_B – об'єм водної ґрунтової витяжки, що взятий для титрування, мл.

Результати експериментальних досліджень наведено на рис. 5.

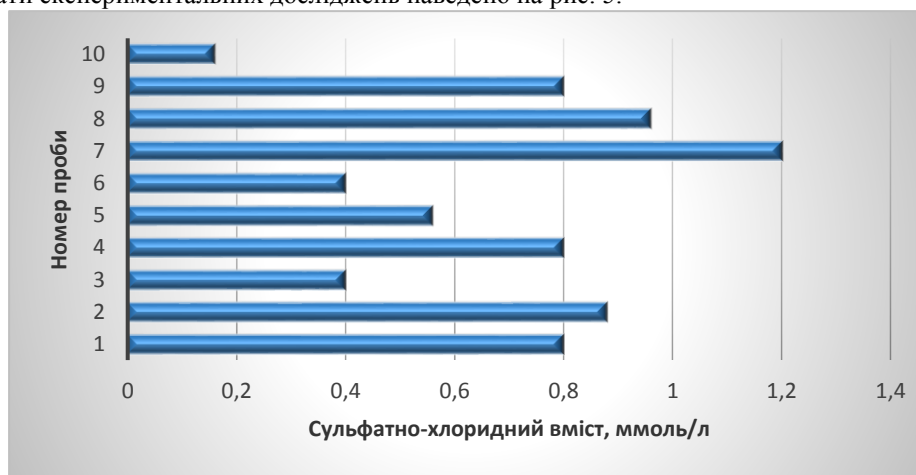


Рисунок 5 – Сульфатно-хлоридний вміст водних ґрунтових витяжок

За величиною кислотності та сульфатно-хлоридним вмістом для кожного досліджуваного поста визначено комплексний показник забруднення. Зокрема, коефіцієнт забруднення за показником кислотності K_{pHi} визначений відношенням вимірюваних значень pH в досліджуваних точках до фонового значення за формулою:

$$K_{pHi} = \text{pH}_i / \text{pH}_{\Phi i} \quad (8)$$

де pH_i – фактичне значення величини кислотності водної ґрунтової витяжки; $\text{pH}_{\Phi i}$ – фонове значення.

Коефіцієнт забруднення за сульфатно-хлоридним вмістом K_{Ci} розраховано за формулою:

$$K_{Ci} = C_i / C_{\Phi i} \quad (9)$$

де C_i – фактичне значення сульфатно-хлоридного вмісту водних ґрунтових витяжок, ммоль/л; $C_{\Phi i}$ – фонове значення.

Результати розрахунків наведено на рис. 6, 7.

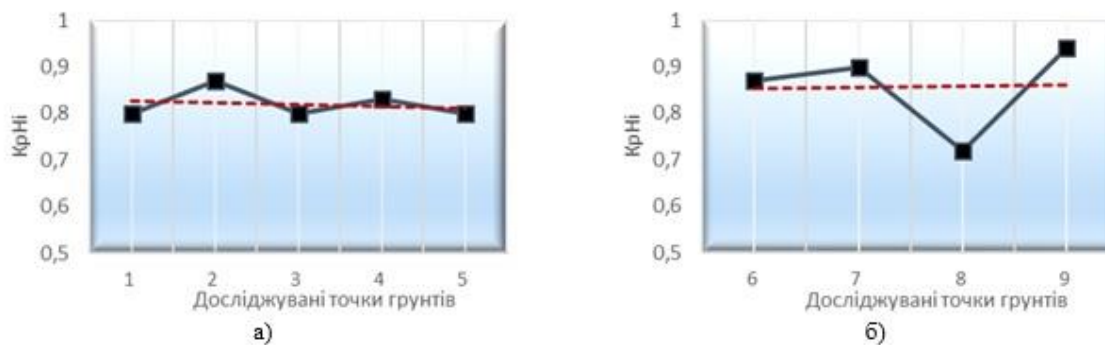


Рисунок 6 – Коефіцієнт забруднення за показником кислотності K_{pHi} в досліджуваних точках відносно фонового значення: а) – точки 1 – 5; б) – точки 6 – 9

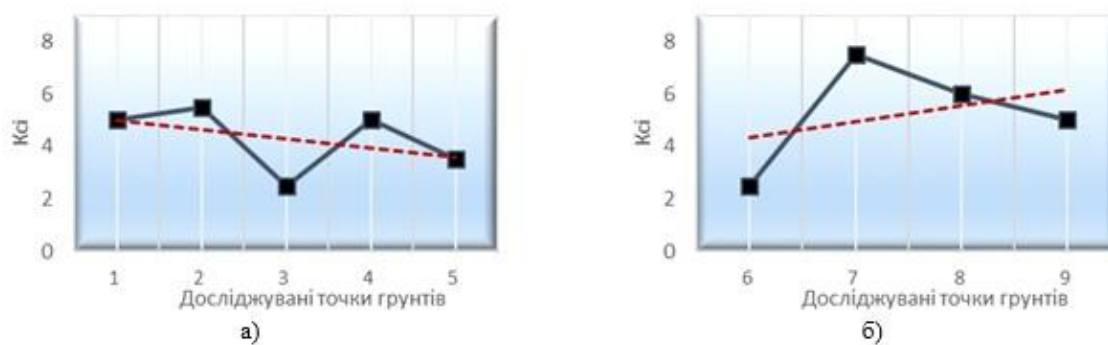


Рисунок 7 – Коефіцієнт забруднення за сульфатно-хлоридним вмістом K_{Cl} в досліджуваних точках відносно фонового значення: а) – точки 1 – 5; б) – точки 6 – 9

Результати хімічного дослідження ґрунтових витяжок показали зміну рН від кислої ($pH \approx 5$) до слабко кислої, майже нейтральної ($pH \approx 6,5$) при фоновому значенні $pH \approx 6,9$. Зазначимо, що в умовах кислої реакції середовища токсичність багатьох хімічних елементів і сполук підвищується і становить небезпеку для рослин, тварин і мікроорганізмів. Зокрема, в фазі проростання пригнічується процес фосфорилювання, знижується потрапляння в рослини Кальцію, Магнію, Калію, Фосфору та Феруму, зменшується споживання води. При цьому, як правило, знижується ємність катіонного обміну ґрунтів, погіршуються деякі водно-фізичні характеристики. Відомо, що у слабко кислих ґрунтах ШР можуть мігрувати до глибини 40 см, у малобуферних – до 60 – 80 см, причому їх найвищі концентрації спостерігаються у шарі 0–10 см [16, 17].

Висновки

Таким чином, дослідження стану ґрунтового покриву поблизу об'єктів автотранспортної інфраструктури в м. Києві вказують на наявні трансформації їх хімічного складу. Ознаками цього є зміна показника кислотності, підвищений вміст у водних ґрунтових витяжках хлоридів і сульфатів відносно фонових концентрацій. Зокрема, значення коефіцієнта забруднення за показником кислотності K_{pH} в досліджуваних точках відповідно становлять 0,8, 0,88, 0,4, 0,8, 0,56, 0,4, 1,2, 0,96 та 0,8, а коефіцієнт забруднення за сульфатно-хлоридним вмістом – 5, 5,5, 2,5, 5, 3,5, 2,5, 7,5, 6. Таким чином, у роботі встановлена залежність впливу АТК на зміну кислотності і сульфатно-хлоридного вмісту ґрунту досліджуваних територій. Ґрунтовий покрив охороняє суміжні середовища від техногенного впливу, представляючи собою геохімічний бар'єр на шляху міграції ШР. Проте можливості ґрунту як буферної системи безмежні.

Отже, пропонуємо здійснювати моніторинг ґрунтового покриву в межах АТК, проводити відбір проб ґрунту з поверхневого шару та з глибини 20 см посезонно на відстані до 100 м, контролювати якісні показники тощо. Необхідно також забезпечити поступове скорочення споживання нафтового палива на автомобільному транспорті, оптимізувати дорожню інфраструктуру, удосконалювати структуру парку АТЗ, запроваджувати сучасні технології перевезень і транспортної логістики.

Список використаної літератури

1. Луканін, В. Н. Промислово-транспортна екологія: підруч. для вузів / В. Н. Луканін, Ю. В. Трофименко – М. : Вища шк. – 2003. – 273 с.
2. Екба, Я. Л. Екологічна кліматологія і природні ландшафти Абхазії / Я. Л. Екба, Р. С. Дбар. – Сухумі. – 2007. – 324 с.
3. Новикова, С. А. Сравнительный анализ загрязнения атмосферного воздуха автотранспортом в России и Германии (на примере г. Киль) / С. А. Новикова // Известия Иркутского государственного университета. Серия: науки о Земле. – 2015. – №13. – С. 131-149
4. Кофанова, О. В. Механізми посилення екологічності вітчизняного автотранспорту за рахунок забезпечення його сталого розвитку / О. В. Кофанова, О. Є. Кофанов // Стратегія розвитку України: економіка, соціологія, право. – 2015. – № 1. – С. 67–73.

5. Матейчик, В. П. Моделирование системы «транспортный поток-дорога» / В. П. Матейчик, М. П. Цюман, Г. О. Вайганг // Міжвузівський збірник «Наукові нотатки». – Луцьк. – 2014. – Вип. 46. – С. 371-381.
6. Кофанов, А. Е. Геоэкологические аспекты моделирования локального загрязнения приземного атмосферного воздуха отработавшими газами автотранспортных средств / А. Е. Кофанов, Ю. Р. Холковский // Горная механика и машиностроение. – 2017. – № 4. – С. 20–33.
7. Гольдфейн, М. Д. Расчетный мониторинг распространения выбросов автомобильного транспорта в крупном промышленном городе [Электронный ресурс] / М. Д. Гольдфейн, Н. В. Кожевников, Н. И. Кожевникова // Успехи современного естествознания. – 2006. – № 4. – С. 35–36. URL: www.gae.ru/use/?section=content&op=show_article&article_id=4168 (дата звернення: 23.01.18).
8. Цыплакова, Е. Г. Приборы и методы контроля и мониторинга воздействия автотранспорта на атмосферный воздух северных городов : дис. на соискание учен. степени доктора технич. наук : спец. 05.11.13 – приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий. – СПб, 2014. – 347 с.
9. Кириенко, О. А. Микробиологическая оценка экологического состояния урбанизированных почв / О. А. Кириенко, Е. Л. Имранова // Экология урбанизированных территорий. – 2008. – № 4. – С. 57 – 61. – ISSN 1816-1863.
10. Миненко, А. К. Функциональная зависимость микробоценоза дерновоподзолистых почв от кислотного режима / А. К. Миненко // Почвоведение. Использование земельных ресурсов. – 2008. – № 2. – С. 1-13. – ISSN 0032-180X
11. Рабош, І. О. Оцінка екологічного стану територій автозаправних станцій, розташованих поблизу автомагістралей / І. О. Рабош, О. В. Кофанова, А. В. Підгорний // Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2018. – № 9 (1285). – С. 236–242. – doi:10.20998/2413-4295.2018.09.34.
12. Офіційний сайт Державної служби статистики України. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://www.ukrstat.gov.ua/>. – Назва з екрана.
13. Концепція розвитку транспортного комплексу м. Києва” (Київська міська державна адміністрація, ДКП "Науково-дослідний інститут соціально-економічних проблем міста"). [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://kievcity.gov>. – Назва з екрана.
14. Канило, П. М. Автотранспорт. Топливоно-екологические проблемы и перспективы: монографія / П. М. Канило. – Х.: ХНАДУ. – 2013. – 272 с.
15. Андрійко, О. О. Хімія: Метод. вказівки до викон. лаборатор. практикуму для студ. техн. спец. бакалавр. циклу підготовки ден. форми навчання / О. О. Андрійко, А. В. Підгорний, Н. А. Гуц. – К.: НТУУ «КПІ». – 2006. – 64 с.
16. Назаренко, І. І. Грунтознавство / І. І. Назаренко, С. М. Польшина, В. А. Нікорич В. А. // Підручник. – Чернівці: Книги – XXI. – 2004. – 400 с.
17. Бережняк М. Ф. Лабораторний практикум з грунтознавства. Методичні матеріали / М. Ф. Бережняк. – Київ: Національний університет біоресурсів і природокористування України. – 2012. – 271 с.

I. Rabosh, PhD, ORCID 0000-0001-6863-3945

O. Kofanova, Prof., ORCID 0000-0002-9851-6392

A. Pidgorny, c.ch.s., as.prof., ORCID 0000-0002-4041-1053

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

STUDY OF URBAN SEAL POLLUTION BY A MOTOR TRANSPORT COMPLEX

The study of the impact of motor transport on the soil cover of the adjoining territories in the city of Kyiv is presented. The ecological crisis is one of the most serious and dangerous problems of the contemporary world and society. Anthropogenic activity leads to the widespread pollution of the atmosphere, hydrosphere and lithosphere, which, in turn, leads to the serious consequences for humanity. According to the results of the chemical analysis of aqueous soil extracts, it was found that in the samples of soils studied there is a change in their chemical composition. Hydrogen index of pH (actual acidity) of aqueous extracts of soil, content of basic cations and anions, sulfate-chloride hardness are determined. On the basis of the obtained results, the index of pollution by the value

of acidity and sulfate-chloride content for each investigated point of ATC areas is established. Experimental studies indicate the need for measures to prevent the occurrence of SF to the pedosphere and their complete re-inactivation.

The conclusion was made on the necessity of using a complex ecological analysis of soils and methods of bioindication for further assessment of the levels of territories pollution. The conducted research can be used for development of the measures for increasing the sustainability of the investigated territories.

Keywords: motor transport complex, environmental safety, harmful substances, pedosfera, soil extraction, physico-chemical analysis.

References

- [1] Lukanin, V., Trofymenko, Ju. Promyslovo-transportna ekologija [Industrial and transport ecology], (Ed.), Vyshha shkola, Moscow, 2003, 273.
- [2] Ekba, Ja., Dbar, R. Ekologichna klimatologija i pryrodni landshafty Abhazii [Ecological climatology and natural landscapes of Abkhazia], Suhumi, 2007, 324.
- [3] Novikova, S. Sravnitelnyy analiz zagryazneniya atmosfernogo vozdukha avtotransportom v Rossii i Germanii (na primere g. Kiel) [Comparative Analysis of Air Pollution by Auto Transport in Russia and Germany (by the Example of Kiel)]. *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta [Irkutsk State University. Series: Earth Sciences]*, 2015, 13, Pp. 131-149. (rus).
- [4] Kofanova, O., Kofanov, O. Mekhanizmy posyleniya ekologichnosti vitchyznianoho avtotransportu za rakhunok zabezpechennia yoho staloho rozvytku [Mechanisms for the increasing of the environmental friendliness of vehicles by ensuring its sustainable development]. *Stratehiia rozvytku Ukrainy: ekonomika, sotsiologhiia, pravo [The development strategy of Ukraine: economics, sociology, law]*, 2015, 1, 67-73.
- [5] Mateichyk, V., Tsiuman, M., Vayhanh, H. Modeliuvannia systemy «transportnyi potik-doroha» [Simulation of the system “traffic flow – road”]. *Mizhvuzivskyi zbirnyk “Naukovi notatky” [Intercollegiate collection “Scientific Notes”]*, 2014, pp. 371-381. (Ukr).
- [6] Kofanov, O., Kholkovskiy, Yu. Geoekologicheskie Aspekty Modelirovaniya Lokal'nogo Zagryazneniya Prizemnogo Atmosfernogo Vozdukha Otrabotavshimi Gazami Avtotransportnykh Sredstv [Geoecological Aspects Of Modeling Of Local Pollution Of Surface Atmospheric Air By Exhaust Gases Of Motor Vehicles]. *Gornaya Mekhanika I Mashinostroenie [Mining Mechanical Engineering and Machine Building]*, 2017, 4, 20–33.
- [7] Gol'dfein, M., Kozhevnikov, N., Kozhevnikova, N., Fetisova, N. Raschetnyi monitoring rasprostraneniya vybrosov avtomobil'nogo transporta v krupnom promyshlennom gorode [Estimate monitoring the spread of road transport emissions in large industrial cities]. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya [Successes of modern science]*, 2006, 4, 35–36.
- [8] Tsyplakova, E. "Pribory i metody kontrolya i monitoringa vozdeystviya avtotransporta na atmosfernyy vozdukh severnykh gorodov [Instruments and methods of control and monitoring the impact of vehicles on the atmosphere of northern cities]", Doctor's degree, Federal'noe gosudarstvennoe byudzhetnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego professional'nogo obrazovaniya "Natsional'nyy Mineral'no-Syr'evoy Universitet "Gornyy" [Federal State Budget Educational Institution of Higher Professional Education "National Mineral and Raw Material University "Gorny"], 2014.
- [9] Kuryenko, O., Ymranova, E. Mykrobiologicheskaya otsenka ekologicheskogo sostoianiya urbanizirovannykh pochv [Microbiological assessment of the ecological condition of urbanized soils]. *Ekologiya urbanizirovannykh territoriy [Ecology of urbanized territories]*, 2008, 4, 57 – 61, ISSN 1816-1863.
- [10] Mynenko, A. Funktsionalnaia zavysymost mykrobotsenoza dernovopodzolyistyykh pochv ot kyslotnogo rezhyma [Functional dependence of microbocenosis of sod podzolic soils on acid regime]. *Pochvovedeniye. Yspolzovaniye zemelnykh resursov [Soil science. Use of land resources]*, 2008, 2, 1-13, ISSN0032-180X
- [11] Rabosh, I., Kofanova, O., Pidhornyi, A. Otsinka ekologichnogo stanu terytorii avtozapravnykh stantsii, roztashovanykh poblyzu avtomahistrاله [Assessment of the ecological status of the territories of filling stations located near motorways]. *Novi rishennia v suchasnykh tekhnolohiiakh [New solutions in modern technologies]*, 2018, 9 (1285), 236–242, doi:10.20998/2413-4295.2018.09.34.
- [12] The official site of the State Statistics Service of Ukraine. [Electronic resource] – Access: <http://www.ukrstat.gov.ua/>. – Nazva z ekrana.
- [13] The concept of development of the Kyiv transport sector "(Kyiv City State Administration, SCE" Research Institute socio-economic problems of the city)". [Electronic resource] – Access: https://kievcity.gov.ua/done_img/Концепція%20розвитку%20громадського%20простору%20в%20місті%20Кієві.pdf. – Nazva z ekrana.

- [14] Kanilo, P. Avtotransport. Toplyvno-ekolohycheskye problemy u perspektyvy: monohrafiia [Motor transport. Fuel and environmental problems and prospects: Monograph]. Kh.: KhNADU, 2013, 272. (Rus).
- [15] Andriiko, O., Pidhornyi, A., Huts N. Khimiia: Metod. vказivky do vykon. laborator. praktykumu dlia stud. tekhn. spets. bakalavr. tsyklu pidhotovky den. formy navchannia [Methodical instructions for the implementation of the laboratory workshop]. K.: NTUU «KPI», 2006, 64.
- [16] Nazarenko, I., Polchyna S., Nikorych V. Gruntoznavstvo [Pedology], Chernivtsi, 2004, 400.
- [17] Berezniak M. Laboratornyi praktykum z gruntoznavstva. Metodychni materialy [Laboratory Workshop on Soil Science. Methodical materials]. Kyiv: Natsionalnyi universytet bioresursiv i pryrodokorystuvannia Ukrainy. [Kyiv: National University of Bioresources and Natural Resources of Ukraine], 2012, 271.

УДК 504/510

И.О. Рабош, аспирант **ORCID 0000-0001-6863-3945**
Е.В. Кофанова, д-р. пед. наук, канд. хим. наук, проф., **ORCID 0000-0002-9851-6392**
А. В. Подгорный, канд. хим. наук, доц., **ORCID 0000-0002-4041-1053**
Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

ИЗУЧЕНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ УРБАНОЗЕМОВ ОБЪЕКТАМИ АВТОТРАНСПОРТНОГО КОМПЛЕКСА

Представленные исследования влияния автотранспортного комплекса на почвенный покров прилегающих территорий в г. Киеве. Актуальность работы определяется увеличением техногенной нагрузки на окружающую среду вследствие роста потоков автотранспортных средств на автомагистралях города. По результатам химического анализа водных грунтовых вытяжек установлено, что в исследуемых образцах почв наблюдается изменение их химического состава. Определены водородный показатель рН (актуальная кислотность) водных вытяжек почвы, содержание основных катионов и анионов, сульфатно-хлорное содержание. Согласно полученным результатам установлено показатель загрязнения по величине кислотности и сульфатно-хлоридным содержанием для каждой исследуемой точки территорий АТК. Экспериментальные исследования показывают необходимость проведения мероприятий по предупреждению попадания ВВ до педосферы и их полной дезактивации.

Ключевые слова: автотранспортный комплекс, экологическая безопасность, вредные вещества, педосфера, грунтовые вытяжки, физико-химический анализ.

Надійшла 20.06.2018
Received 20.06.2018

ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ

Для подання рукопису до журналу автори повинні дотримуватись всіх встановлених вимог, які вказані нижче.

У разі невідповідності поданих матеріалів статті пунктам цих вимог, а також якщо вони не відповідають тематиці наукового журналу, редакція повертатиме авторам матеріали на доопрацювання!

Обсяг статті

Загальний обсяг статті – від 6 до 10 сторінок формату А4. Сторінки повністю заповнені текстом. Схеми, рисунки, таблиці й формули повинні бути пронумеровані та розміщені в тексті після посилань на них. Матеріал має бути викладений стисло, без повторювань даних таблиць і рисунків у тексті. Неприпустимо використовувати елементи форматування як «розрив розділу з нової сторінки» та колонтитули.

Стаття має бути ретельно перевірена авторами та відповідати всім пунктам вимог до оформлення!!!

Текстовий редактор

Стаття набирається в текстовому редакторі **Microsoft Word (версії 2007 та вище)** і зберігається з розширенням *.doc або *.docx.

Обов'язково надсилається стаття, збережена у форматі *.pdf !!!

Загальне оформлення:

1) **Мова.** Статті приймаються до друку трьома мовами: українською, російською, англійською.

2) **Параметри сторінки:**

- Поля: зліва, справа, зверху, знизу – 2,5 см.
- Вирівнювання основного тексту – **за шириною.**
- Перші рядки всіх абзаців – **з відступом 1,0 см!!!**
- Шрифт – **Times New Roman, кегль 10, міжрядковий інтервал 1.**
- Назва статті друкується великими (Caps Lock) напівжирними літерами (Ж) – **кегель 14.**
- Заголовки елементів основного тексту (Вступ, Мета та завдання тощо) виділяються напівжирним шрифтом (Ж).

3) **Структура статті:**

- **номер УДК** (у верхньому лівому кутку сторінки, напівжирним шрифтом кегль 10)
- **прізвища авторів** (приклад: **І.І. Петренко** (укр.), **И.И. Петренко** (рос.) **I. Petrenko** (англ)) та відомості про авторів (науковий ступінь, вчене звання); **індекс ORCID – обов'язково;**
- **(Порядок оформлення наукових ступенів та вчених звань описано нижче в цьому ж документі в розділі «Рекомендовані скорочення вчених звань і наукових ступенів»).**
- **повна назва організації** (навчального закладу, установи) – **вирівнювання за правим краєм;**
- **реферат обсягом від 1000 до 1100 знаків** повинен відображати короткий зміст статті, не повторювати назву, не містити загальних фраз та бути структурованим (мета дослідження, методика реалізації, результати дослідження, висновки). В англійській версії статті наводяться реферат обсягом 1700-2000 знаків,
- **ключові слова:** (6–8 слів), словосполучення «Ключові слова» – напівжирним + курсив.

Відповідно до постанови Президії ВАК України № 7-05/1 від 15.01.2003р. до друку приймаються наукові статті, що мають такі елементи:

Основний текст статті

Вступ (постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими або практичними завданнями; аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання даної проблеми, на які спирається автор; виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, яким присвячується зазначена стаття);

Мета та завдання (формулювання цілей статті, постановка завдання);

Матеріал і результати досліджень (виклад основного матеріалу дослідження, з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів, з можливим поділом на частини з відповідними назвами);

Рисунки (діаграми, фото тощо) подаються у **чорно-білому зображенні** разом із текстом, після посилань на них. **Вимога до графічних матеріалів:** будь-яка ілюстрація повинна бути єдиним нерозривним графічним об'єктом. Рекомендується застосування растрових форматів з роздільною здатністю **не менше 300 dpi**. Рисунок має бути розташований у **центрі, без обтікання текстом**. Підписи до рисунків повинні містити нумерацію в порядку розміщення в тексті та пояснювальний підпис. Неприпустимо включати підписи до самого рисунка. **Рисунок не повинен займати всю площу аркуша!!!**

Крапки після назви структурних частин статті не ставити.

Графіки повинні містити підписи **усіх осей на самому рисунку**. Будь-який інший вигляд підпису розглядатись та виправлятись не буде!

Таблиці. При заповненні слід користуватись шрифтом 10 кеглю. Кожна таблиця повинна мати порядковий номер та назву і розташовуватись після посилання на неї у тексті статті. Якщо таблиця не вміщується на сторінці або виходить на іншу, слід використати позначення «Продовження табл.».

Формули повинні бути набрані за допомогою редактора формул **Math Type (версія 6.8 і вище)** або внутрішній редактор формул у Microsoft Word з **розмірами: звичайного символу – 11, великого індексу – 10, малого індексу – 9.** Кириличні та грецькі символи мають бути набрані прямим шрифтом, латинські літери – похилим. Виняток становлять символи операторів і стандартних функцій, які набираються прямим шрифтом. Нумерація формул, на які є посилання в тексті, – справа в дужках. Цілі частини від десяткових відокремлюються комою **Одиниці розмірності можна набирати окремо від формул, або у формулах, з обов'язковим використанням проміжку.**

Висновки: (навести основні висновки з дослідження та перспективи його подальшого розвитку в цьому напрямку).

Список використаної літератури наводиться в порядку посилань у тексті, відповідно до ДСТУ 8302:2015.(укр) Посилання на літературні джерела в тексті наводяться у квадратних дужках.

Список використаних літературних джерел подається **двічі:** мовою оригіналу відповідно до ДСТУ 8302:2015.(укр, рос) і англійською, відповідно до вимог IEEE style

У разі відсутності або низького рівня перекладу англійської версії списку використаної літератури (References) стаття буде повернута на доопрацювання!!!

Для надання відомостей про авторів англійською, або російською мовами, слід використовувати загальноприйнятую лексикку перекладу наукових ступенів, вчених звань, посад (описано в розділі «Рекомендовані скорочення вчених звань і ступенів»).

Англійська анотація за обсягом рекомендується більшою за українську (російську) 1700-к2000 знаків, оскільки для закордонних вчених анотація є, як правило, єдиним джерелом інформації про зміст статті.

У разі відсутності або низького рівня перекладу англійської анотації (в Google Translate та ін.) стаття буде повернута на доопрацювання!!!

В окремому файлі подаються відомості про авторів у вигляді анкети:

(Анкети подаються **3 мовами (укр., англ. та рос.)**. Вказується повна назва організації або установки, вказати місце де працює автор. Якщо всі автори статті працюють або навчаються в одній установі, можна не вказувати місце роботи кожного автора окремо.)

| | |
|---|--|
| Прізвище, ім'я, по-батькові автора (повністю, без скорочень) | |
| Вчений ступінь, вчене звання, посада | |
| Місце роботи кожного автора в називному відмінку (повна назва без скорочень) | |
| Поштова адреса місця роботи, з поштовим індексом | |
| Контактний телефон | |
| Електронна адреса | |
| ORCID | |

Відповідальність за зміст статті несуть автори. Остаточне рішення щодо друку статей ухвалює редколегія. Редакція залишає за собою право проводити редакційну правку статей.

Редакція журналу здійснює перевірку на плагіат за допомогою спеціального програмного забезпечення!!!

Статті, які не відповідають вимогам редакції журналу "Енергетика: економіка, технології, екологія" та не пройшли перевірку на плагіат, будуть повернуті на доопрацювання.

Увага!!! На електронну адресу журналу надсилається:

- стаття версія в форматі *.doc або *.docx;
- стаття версія в форматі *.pdf (**ОБОВ'ЯЗКОВО**);
- анкета відомостей про авторів;
- акт експертизи про можливість оприлюднення матеріалів у засобах масової інформації.

Контакти:

- тел.: +38(044) 204-82-37;
- сайт: <http://energy.kpi.ua>;
- e-mail: kravkpi@ukr.net