

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

ЕНЕРГЕТИКА

економіка, технології, екологія

Науковий журнал

№ 1 (55) - 2019

Виходить 4 рази на рік
Заснований у березні 2000 року

Енергетика сталого розвитку
Smart Grid системи та технології
Технології та обладнання в енергетиці
Енергетична ефективність та енергозбереження
Системні еколого-енергетичні дослідження

Київ

Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

2019

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 Стржелецькі (*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 № 8 від 09 вересня 2019 р.).

Коректор В.Г. Смоляр. Комп'ютерна верстка О.С. Іщенко.

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 Видавництво «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, 2019

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

POWER ENGINEERING

economics, technique, ecology

ENERHETYKA:
ekonomika, tekhnolohiyi, ekolohiya

The Scientific Journal

№ 1 (55) – 2019

Published 4 issues per year

Founded in March 2000

Sustainable energy
Smart Grid system of ta technologies
Technologies and equipment in energetics
Energy efficiency and energy savings
System environmental-energy research

Kyiv

Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

2019

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 № 8 on September 09, 2019).

Proofreading V.G. Smoliar. Desktop publishing O.S. Ishchenko.
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 Publ.hous "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, 2019

ЗМІСТ

ЕНЕРГЕТИКА СТАЛОГО РОЗВИТКУ

С.П. Денисюк. Енергетичний підхід – вимоги якісних змін у розвитку енергетики..... 7

SMART GRID СИСТЕМИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ

Ю.А. Веремійчук, І.В. Притискач, О.С. Ярмолюк. Модель функціонування інтегрованої системи енергопостачання з використанням когенерації та врахуванням перспектив розвитку біоенергетики в Україні..... 29

ТЕХНОЛОГІЇ ТА ОБЛАДНАННЯ В ЕНЕРГЕТИЦІ

Т.Л. Кацадзе, Ю.М. Паненко, О.М. Янковська. Математичне забезпечення мультиагентного управління оптимальним розмиканням розподільних електричних мереж 41

В.В. Кучанський. Застосування автоматичного шунтування фаз для подавлення повторної дуги в паузі ОАПВ лініях електропередавання надвисокої напруги..... 49

ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

В.М. Горбов, С.М. Мовчан, Д.М. Соломонок. Перспективи модернізації ГТС України регенеративними газотурбінними установками..... 56

С.М. Стовпник, О.С. Темченко. Проблеми підвищення енергоефективності геотехнологій на гірничорудних підприємствах. 67

О.М. Терентьєв, А.Й. Клещов, А.І. Крючков, М.І. Сергієнко. Технологічні параметри руйнування гірських порід при класичному і молекулярно-хвильовому підходах..... 74

СИСТЕМНІ ЕКОЛОГО-ЕНЕРГЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

К.А. Єрмоїна, Є.А. Літвінова Небезпеки та превентивні заходи при виробництві полімерних матеріалів на основі поліамідів 83

О.О. Борисов, О.В. Кофанова. Інтегральний показник геохімічного забруднення міських рекреаційних зон внаслідок автотранспортного навантаження 89

Вимоги до оформлення статей..... 102

CONTENTS

SUSTAINABLE ENERGY

- S. Denysiuk.** Energy transition - requirements for quality changes in energy sector development 7

SMART GRID SYSTEM AND TECHNOLOGY

- Y. Veremiichuk, I. Prytyskach, O. Yarmoliuk.** The functioning model of integrated energy supply system with co-generation units operation, taking into account prospects of bioenergy development in Ukraine..... 29

TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT IN ENERGETICS

- T. Katsadze, O. Panienko, O. Iankovska.** Multiple agent management by distribution electric networks optimal dispatch..... 41
- V. Kuchansky.** Application of automatic phase shunting for suppression of the secondary arc in pause pairs of extra high voltage transmission lines..... 49

ENERGY EFFICIENCY AND ENERGY SAVINGS

- V.Gorbov, S. Movchan, D. Solomonuk.** Prospects of modernization of the ukrainian gas transport system with regenerative gas turbine power plants..... 56
- S. Stovpnyk, O. Temchenko.** The problem of improving the efficiency of geotechnology in mining companies 67
- O. Terentyev, A. Kleshchev, A. Kryuchkov, N. Sergienko.** Technological parameters destruction of rocks at classical and molecular wave approaches 74

SYSTEM ENVIRONMENTAL-ENERGY RESEARCH

- Y. Yeriomina, Y. Lytvynova.** Dangers and preventive measures during production of polymeric materials based on polyamides 83
- O. Borysov, O. Kofanova.** Integral indicator of geochemical pollution of urban recreational territories caused by motor traffic 89

ЕНЕРГЕТИКА СТАЛОГО РОЗВИТКУ SUSTAINABLE ENERGY

УДК 621.3

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

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

ЕНЕРГЕТИЧНИЙ ПЕРЕХІД – ВИМОГИ ЯКІСНИХ ЗМІН У РОЗВИТКУ ЕНЕРГЕТИКИ

У статті наведено особливості формування основ енергетичного переходу. Показано, що для реалізації сучасних положень енергетичного переходу необхідно задіяти системний підхід. Базовими елементами такого переходу є впровадження відновлюваної енергетики та енергоефективність (інтенсифікація зниження енергоємності товарів та послуг).

Представлено основні фактори та чинники глобального енергетичного переходу, сформовані Міжнародним агентством з відновлюваної енергетики (IRENA) у співпраці з іншими міжнародними агентствами в кінці 20-х років ХХІ ст. Проаналізовано розвиток законодавчого та нормативно-правового регулювання діяльності ринків електроенергії в Європейському Союзі, що створили системні передумови реалізації положень енергетичного переходу в Європі.

Розглянуто характерні риси пришвидшення впровадження відновлюваних джерел енергії, зокрема, сонячної енергетики, у світі та в Україні в 2017–2018 рр., зокрема, положення Четвертого енергетичного пакету (Winter energy package) та побудову Європейського Енергетичного Союзу.

Описано особливості реалізації вимог енергетичного переходу в Україні у сфері впровадження відновлюваних джерел енергії.

Ключові слова: енергетичний перехід, енергетична система, відновлювана енергетика, енергоефективність, сонячна енергетика, вітрова енергетика

Вступ

Сучасна трансформація міжнародних енергетичних ринків базується на перебудові паливно-енергетичного балансу, зміні світових центрів споживання вуглеводнів і енергії в цілому, безперервній хвилі технологічних проривів [1, 11, 17, 18, 29, 35–39]. Особливості трансформації енергетичного сектора в кінці 20-х років ХХІ ст. визначаються наступним:

- 1) енергія – це товари, послуги та сервіси;
- 2) складові «чистої енергії»: сонячна, вітрова, накопичувачі, децентралізація, гранична генерація (frontier power), енергетичні хаби, ущільнення енергетичних та комунальних послуг;
- 3) новітній транспорт: електрифікований транспорт, автономне водіння, розширена мобільність, ущільнення транспортних потоків, обмеження на використання органічних видів палива;
- 4) нові властивості енергетичних товарів: зріджений газ, нафтопродукти, електроенергія, викиди CO₂, якість енергозабезпечення;
- 5) цифрова індустрія: Інтернет речей (Internet of Things), автоматична новітня аналітика, новітні матеріали, взаємовплив енергетики та індустрії.

Перетворення глобальної енергетичної системи виходить за рамки перетворення сектора енергетики. Це перетворення національних економік і суспільств. Метою історичної Паризької угоди від 2015 року щодо клімату є, як мінімум, утримати зростання глобальної середньої температури «набагато нижче 2 °С» в ХХІ ст. у порівнянні з рівнями, що спостерігалися в період до бурхливого розвитку промисловості.

Нині багато фахівців стверджують, що гальмування зростання глобальної температури нижче 2 °С технічно можливе, що є економічно, соціально та екологічно більш корисним, ніж той шлях, який випливає з наявних на сьогодні національних планів і політик. Для цього глобальна енергетична система повинна пройти глибоку трансформацію і перебудову, невідкладно замінюючи стару інфраструктуру, яка ґрунтується на використанні викопного палива [38, 39]. Багато комплексних досліджень підтверджують, що для досягнення цілей Паризької угоди у 2050 році приблизно 70 % структури енергозабезпечення світу

повинні належати до низьковуглецевої [29], у той же час Ціллю у сфері сталого розвитку 7 (SDG7) передбачається зобов'язання щодо забезпечення доступу до недорогих, надійних, стійких і сучасних джерел енергії для всіх [1]. Тому використання відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) в поєднанні з швидким підвищенням енергоефективності є наріжним каменем прийняттого рішення з питань клімату та захисту довкілля.

1. Формування основ енергетичного переходу

Енергетичний перехід (нім. *Energiewende*, англ. *Energy Transition*) – це перехід провідних країн до сталих економік шляхом відновлювальної енергетики, енергоефективності та сталого розвитку, де кінцевою метою є відмова від використання вугілля та інших невідновлюваних енергоресурсів [22, 27]. Термін «енергетичний перехід» завдячує своєю появою публікації у 1980 році німецького Інституту Прикладної Екології (нім. *Öko-Institut*), у якій йшлося про необхідність повної відмови від ядерної енергії та енергії з нафти [27, 28].

У наступні два десятиріччя смислове навантаження цього терміну розширювалося щодо його тлумачення, він набув своєї розширеної сутності у 2002 р. Ключовий політичний документ, яким визначено Енергетичний перехід (*Energiewende*), був опублікований німецьким урядом у вересні 2010 р., за півроку до ядерної аварії на Фукусімі. Відповідна законодавча підтримка була прийнята в 2011 р. Основні аспекти *Energiewende* включають [26]:

- зменшення викидів парникових газів: зменшення викидів на 80–95 % до 2050 р.;
- цілі щодо використання відновлюваної енергії: 60 % частка до 2050 р. (гідро-, сонячна та вітрова енергія);
- енергоефективність: ефективність по електроенергії – до 50 % до 2050 р.;
- відповідне стимулювання науково-дослідницьких розробок.

Можемо стверджувати, що енергетичний перехід означає суттєву зміну у енергетичній політиці, зокрема, переорієнтацію політики від попиту до пропозиції та заміщення традиційної централізованої генерації розосередженою генерацією (РГ), а також заміна перевиробництва та споживання енергії, якого можна було б уникнути за рахунок енергозберігаючих заходів та зростання енергоефективності [24, 25, 29].

У 2015–2018 рр. назрів наступний крок – сучасне уявлення терміну «енергетичний перехід», як результат розвитку проривних технологій та суттєвого впливу зміни клімату. Було визначено, що для здійснення енергетичного переходу для низьковуглецевої економіки необхідно провести цілий ряд реформ в області політики у відношенні як до енергозабезпечення, так і до енергоспоживання [9, 11, 24–29]. Прикладами таких реформ служать раціоналізація енергетичних субсидій, встановлення тарифів за викиди вуглецю, розвиток відкритих і ефективних ринків енергоресурсів, сприяння технічним інноваціям і керування кліматичними ризиками для енергозабезпечення. Процес переходу також вимагає проведення структурних реформ, що сприятимуть адаптації компаній і працівників до нових ринкових умов для галузей промисловості і спільнот, на які процес переходу може справити негативний вплив.

Важливими є питання взаємозв'язку енергетичного переходу і клімату, здійснення енергетичного переходу у світовому масштабі, погляд компаній на енергетичний перехід і клімат з акцентом на трансформацію енергобізнесу в бік більшої екологічності, ВДЕ і потенціал використання нових технологій. На сьогоднішній день можна визначити наступні ознаки сучасного енергетичного переходу [9, 25–29]:

1) перехід до більш гнучкої архітектури енергетичних систем за рахунок зростання частки ВДЕ та РГ в енергобалансі, розвитку інтелектуальних мереж і систем (*Smart Grid*) у взаємозв'язку з розвитком технологій та ринку зберігання енергії, а також за рахунок появи активних споживачів (*prosumer* та *prosumage*);

2) перехід до нового пакету технологій: генерація електроенергії на базі ВДЕ, застосування силової електроніки, систем зберігання енергії, водневої енергетики, цифрової платформи (*Cloud-технології*) і *Big Data*, *Internet of Things*, високих фінансових технологій, наприклад, блокчейн;

3) перехід до нової бізнес-моделі електроенергетики: від традиційного ланцюжка формування доданої вартості «генерація – трейдинг – передача – збут» до моделі «Інтернету енергії» (*Internet of Energy*) і надання послуг у *sms-середовищі*, а також перехід до розвитку нових сервісів для «споживачів–виробників» енергії;

4) трансформація системи регулювання ринку електроенергетики: перехід від підтримки ВДЕ і конкуренції на ринку електроенергії до пріоритету підтримки споживача, інтеграції локальних рішень, а також від постачання енергії до «з'єднання потужностей» в рамках «Інтернету енергії» (*Energy net*), перехід до «гнучкого» ринку.

Міжнародним агентством з відновлюваної енергетики (*IRENA*) визначено, що важливо задіяти системний енергетичний підхід, який має передбачати [24]:

- взаємодію секторів електроенергетики, опалення, охолодження та транспорту;
- зв'язок відновлюваної енергетики з енергоефективністю;

– узгодження національної, регіональної та муніципальної політики;
– політичну волю та раціональне управління, які потрібні на першому плані – призупинення субсидій на викопні палива і атомну енергетику, введення вуглецевого ціноутворення та забезпечення однакових умов.

На сьогодні можна констатувати зближення позицій Міжнародного Енергетичного Агентства (IEA) і IRENA [29]. Доцільно навести окремі результати спільного дослідження IEA і IRENA «Перспективи енергетичного переходу» (Perspectives for the Energy Transition) [29]:

1. Очікується, що близько 70% світового енергобалансу в 2050 р. буде низьковуглецевим, в основному за рахунок ВДЕ, енергоефективності, а також технологій уловлювання та зберігання вуглецю. Здійснення енергетичного переходу потребуватиме значних додаткових політичних заходів у сфері вдосконалення енергетичної політики та правил роботи ринків електричної і теплової енергії;

2. Успішна інтеграція ВДЕ в роботу електроенергетичних систем стає ключовим елементом економічно ефективного енергетичного переходу;

3. Забезпечення доступу до сучасних енергетичних послуг для тих, хто на даний час їх позбавлений, залишається пріоритетом (поряд з покращенням якості доквілля за рахунок впровадження екологічно чистих енергетичних технологій);

4. Енергетичний перехід, крім виробництва та розподілу енергії, охоплюватиме і сектори кінцевого споживання: на електромобілі припадатиме домінуюча частка пасажирських і вантажних перевезень; розгортання ВДЕ має перейти за межі енергетичного сектора в теплопостачання і транспорт;

5. Пріоритетом стане доступне, надійне та стійке біоенергопостачання.

Однак на сьогодні темпи змін залишаються надто повільними [9, 11, 18, 29]. Це обумовлено наявними проблемами: зниження енергоемності світової економіки в останні роки було недостатнім; в області опалення та охолодження зростання рівнів використання ВДЕ було низьким; проблеми в транспортному секторі, як і раніше, перешкоджають прогресу.

Визначено наступні інновації як ознаки прискореного енергетичного переходу: технологічні досягнення; дигіталізація; віртуальні електростанції і блокчейн; розширення доступу до енергії; взаємодія з електромобілями; акумулювання тепла і електроенергії. Сформовано напрямки пришвидшення енергетичного переходу [7, 25, 29]:

– встановити пріоритети через податкові та інші фінансові стимули;
– встановити цілі для всієї енергетичної системи, включаючи всі основні сектори кінцевого споживання;

– мислити нестандартно, зокрема, підходити до викликів системно;

– проектування маневреності (гнучкості) у діях;

– ухвалення політики, що забезпечує швидкий розвиток відновлюваної енергетики.

Перехід до майбутнього на основі відновлюваної енергетики є безальтернативним, але він відбудеться не обов'язково в терміни, необхідні для забезпечення стабілізації клімату або виконання SDG7 [1, 29].

2. Основні фактори та чинники глобального енергетичного переходу

Згідно з висновками доповіді «Глобальна енергетична трансформація: Дорожня карта до 2050 року» (Global Energy Transformation: A roadmap to 2050), опублікованої IRENA 17 квітня 2018 року, темпи розгортання відновлюваної енергетики повинні зрости принаймні в шість разів по всьому світу, для досягнення цілей декарбонізації економіки до 2050 року і запобігання катастрофічним змінам клімату, як це визначено Паризьким Угодою [24]. У доповіді вказано, що в умовах 6-ти кратного збільшення обсягів будівництва потужностей ВДЕ, світова економіка отримає додатковий приріст в 1% ВВП, а також ще більш значні вигоди, які не фіксуються в ВВП, зокрема, попередження гірших наслідків зміни клімату, зменшення забрудненості повітря і поліпшення здоров'я населення.

Глобальна енергетична система повинна зазнати істотного перетворення – трансформуватися з системи, повсюдно заснованої на викопному паливі, в систему високої ефективності, що заснована на широкому застосуванні ВДЕ.

На даний час світові тенденції в області викидів не відповідають цільовим показникам щодо утримання зростання глобальної температури нижче 2 °С. Плани національних урядів як і раніше абсолютно не відповідають потребам в зниженні викидів. У відповідності з поточними та запланованими політиками світ витратить свій «вуглецевий бюджет» (CO₂), пов'язаний з виробництвом енергії, менш ніж за 20 років, щоб утримати зростання глобальної температури набагато нижче 2 °С (з ймовірністю 66%). При цьому викопне паливо, таке як нафта, природний газ і вугілля, продовжить переважати в світовому енергобалансі ще багато десятиліть. Щоб досягти мети – утримати зростання температури нижче 2 °С, вкрай важливо вжити термінових заходів. Для досягнення зазначеної мети до 2050 р. необхідно скоротити сукупні викиди ще як мінімум на 470 ГВт у порівнянні з поточними і наміченими політиками (звичайний хід діяльності).

Енергоефективність та відновлювана енергія є основоположними елементами перетворення енергетичної системи. Якщо за допомогою різних способів можна пом'якшити зміни клімату, то відновлювана енергія та енергоефективність забезпечують оптимальний шлях до досягнення значного скорочення викидів необхідними темпами. Поєднання цих двох елементів може забезпечити необхідне скорочення на більш ніж 90% викидів CO₂, пов'язаних з виробництвом енергії, з використанням безпечних, надійних, доступних і поширених технологій. Застосування відновлюваної енергії та підвищення енергоефективності потрібні у всіх секторах. Сумарну частку відновлюваної енергії необхідно збільшити з приблизно 15% в загальних запасах первинної енергії в 2015 р. до приблизно двох третин у 2050 р. Для досягнення цілей в плані клімату інтенсивність використання енергії в світовій економіці необхідно скоротити до приблизно двох третин до 2050 р., зменшивши загальні запаси первинної енергії у 2050 р. до рівнів трохи менших, ніж рівні 2015 р.

До 2050 року всі країни можуть значно збільшити частку відновлюваної енергії в їх загальному енергоспоживанні. У глобальній дорожній карті REmap, розробленій IRENA, передбачається, що ВДЕ можуть становити 60% або більше в загальному кінцевому енергоспоживанні багатьох країн [24]. Наприклад, Китай в змозі збільшити частку ВДЕ у своєму енергоспоживанні з 7% в 2015 р. до 67% в 2050 р. У Європейському Союзі ця частка може бути збільшена з приблизно 17% до більш ніж 70%. Індія і США можуть розглядати збільшення частки до двох третин або більше.

В основі переходу до моделі сталого енергетичного майбутнього лежить енергетичний сектор, де немає викидів вуглекислого газу і переважають ВДЕ. Частка ВДЕ в енергетичному секторі повинна збільшитися з 25% в 2017 р. до 85% у 2050 р. переважно завдяки збільшенню виробництва сонячної та вітрової енергії. Такий перехід потребуватиме нових підходів до планування та експлуатації енергетичних систем, роботи ринку, а також до регулювання і суспільної політики. Оскільки низьковуглецева електроенергія стає основним енергоносієм, частка електрики, спожитої в областях кінцевого споживання, повинна подвоїтися з приблизно 20% в 2015 р до 40% у 2050 р. Відновлювальна електроенергія забезпечить без малого 60% в загальному споживанні відновлюваної енергії, що в 2,5 рази більше у порівнянні з поточним показником у загальному споживанні відновлюваної енергії.

Буде потрібно наростити споживання відновлюваної енергії в промисловому, транспортному і будівельному секторах [24]. У цих галузях важливу роль повинні відігравати ВДЕ, включаючи збільшення відновлюваних джерел електроенергії, а також сонячної теплової, геотермальної енергії та біоенергії. Великий внесок матиме також відновлюване паливо і пряме використання енергії, що є необхідним для опалення та транспорту. Для таких цілей використання біомаси може забезпечити трохи менше двох третин відновлюваної енергії, що споживається для опалення та виробництва палива; сонячна тепла енергія може забезпечити приблизно одну чверть, а геотермальна енергія та інші ВДЕ – решту.

Енергоефективність є критично важливою для будівельного сектора. Однак у даному секторі великою проблемою лишаються повільні темпи підвищення енергоефективності частково через низькі темпи будівельних ремонтів, що становить 1% на рік за існуючим фонду будівель і споруд. Необхідно наростити темпи робіт будівельного ремонту в три рази. Згідно запропонованого REmap сценарію інтенсивність використання енергії (у відсотках за рік) від наявних 1,8 % за період 2010–2015 рр. має зрости до 2,8 % у період 2015 – 2050 рр..

Перетворення глобальної енергетичної системи є економічно доцільним. Додаткові витрати, пов'язані з повномасштабним, тривалим перетворенням енергетичної системи, складуть 1,7 трлн. дол. США на рік в 2050 р. Однак економія на витратах завдяки зменшенню забруднення повітря, поліпшення ситуації в сфері охорони здоров'я та зменшення шкоди довкіллю в рази перевищить такі витрати. Згідно зі сценарієм в дорожній карті REmap зекономлена сума тільки в цих трьох областях в середньому складе 6 трлн. дол. США в рік до 2050 р. Сукупний дохід завдяки збільшенню ВВП в період з 2018 р. по 2050 р. складе 52 трлн. дол. США.

Необхідно збільшити сукупний обсяг інвестицій в енергетичну систему в період з 2015 р. по 2050 р. приблизно на 30% (з відповідно до поточних 93 трлн. дол. США до намічених політиками до 120 трлн. дол. США). Інвестиції у відновлювану енергію та енергоефективність поглинуть переважну частину сумарних інвестицій в енергетику. В цілому протягом зазначеного періоду у світову економіку будуть потрібні інвестиції в розмірі приблизно 2% від середнього щорічного світового ВВП у рішення, в яких відсутні викиди вуглекислого газу, включаючи відновлювану енергію, енергоефективність та інші інноваційні технології.

В дорожній карті REmap глобальний соціально-економічний слід від енергетичної системи значно покращиться (у порівнянні з еталонним сценарієм). До 2050 р спостерігатиметься підвищення добробуту на 15%, зростання ВВП на 1% та збільшення трудової зайнятості на 0,1% [24].

При комплексному підході перетворення може значно поліпшити загальну ситуацію з трудовою зайнятістю в енергетичному секторі. У кінцевому підсумку перехід на ВДЕ створить більше робочих місць в енергетичному секторі, ніж буде втрачено у сфері викопного палива. В дорожній карті REmap до 2050 р.

в сфері викопного палива буде втрачено 7,4 млн. робочих місць, але буде створено 19,0 млн нових робочих місць у відновлюваній енергетиці, сферах енергоефективності, модернізації мереж і забезпечення гнучкості енергетичної системи, що в кінцевому підсумку забезпечить чисте збільшення робочих місць на 11,6 млн. Чисте зростання робочих місць в регіонах коливатиметься в динаміці за часом, але практично у всіх регіонах і країнах спостерігається позитивний вплив.

Світова фінансова система має бути приведена у відповідність з більш широкими вимогами до стійкості та перетворення енергетичної системи. Фінансові обмеження і бездіяльність можуть гальмувати інвестиції, необхідні для забезпечення перетворення енергетичної системи. Розширення доступу до фінансів і скорочення позикових коштів ще більше покращать ситуацію як з ВВП, так і з трудовою зайнятістю.

Згодом у 2018–2019 роках IRENA здійснила уточнення показників запропонованого нею енергетичного переходу. Згідно з останньою доповіддю IRENA «Перетворення глобальної енергетичної системи: дорожня карта до 2050 року (видання 2019)» (Global energy transformation: A roadmap to 2050 (2019 edition)), представлений 9 квітня 2019 р. в рамках Берлінського діалогу по трансформаційних процесів в сфері енергетики, близько 86% світового попиту на електроенергію може бути задоволено з використанням ВДЕ (в рамках сценарію REmap Case, при реалізації якого людство виконує мету Паризької кліматичної угоди) [7, 25, 29]. На частку СЕС припадатиме 9717 ГВт та ВЕС – 6044 ГВт. ВДЕ є найбільш ефективним і доступним рішенням для обернення назад тенденції зростання викидів CO₂.

Згідно сценарію Reference Case сумарні викиди CO₂ у 2050 р. можуть очікуватися на рівні 33 Гт. Згідно оновленого сценарію REmap ці викиди у 2050 році можуть бути знижені до 9,8 Гт (на 70 %). Внесок у зниження викидів CO₂: електрофікація отримання теплоти та електрифікація транспорту – 36%; ВДЕ – 39%; енергоефективність та інше – 25%.

Для енергетичної трансформації згідно сценарію Reference Case накопичені інвестиції за період 2016–2050 рр. складуть 95 трлн. дол. США, а згідно сценарію REmap 110 трлн. дол. США. Розподіл сумарних інвестицій в трлн. дол. США згідно цих двох сценаріїв складуть відповідно: викопне паливо – 40,0 та 20,0; електрифікація та інфраструктурні перетворення – 13,0 та 26,0; ВДЕ – 13,0 та 27,0; енергетична ефективність – 29,0 та 37,0.

Обсяг додаткових інвестицій у порівнянні з нинішньою траєкторією розвитку (сценарій Reference Case) становитиме 15 трлн. дол. За розрахунками IRENA, ці інвестиції з лишком окуплюються. Протягом наступних 30 років світова економіка в цілому заощадить до 160 трлн. дол. США, уникне частини витрат на охорону здоров'я, енергетичні субсидії та ліквідацію збитків, пов'язаних зі зміною клімату. Кожен долар, витрачений на перехід на нові джерела енергії, окупиться семикратно. До 2050 року енергетична трансформація дасть додатковий приріст світового ВВП в 2,5%.

Перехід на ВДЕ має економічний сенс. До середини XXI ст. світова економіка зросте, і робочі місця, створені в секторі енергетики, підвищать глобальну зайнятість на 0,2%. Політика, спрямована на сприяння обґрунтованому, справедливому і інклюзивному переходу, може максимально збільшити вигоди для різних країн, регіонів і спільнот.

Більш детально охарактеризуємо складові глобальної енергетичної трансформації, представлені в документі «Перетворення глобальної енергетичної системи: дорожня карта до 2050 року (видання 2019)» [25]:

1) Трансформація глобальної енергетичної системи має суттєво пришвидшитися для досягнення цілей Паризької угоди. Ці цілі полягають у тому, щоб зберегти зростання середніх глобальних температур «значно нижче 2 °C та в ідеалі обмежити потепління до 1,5 °C у XXI ст. порівняно з доіндустріальними рівнями».

Незважаючи на явні докази зміни клімату, спричиненої людиною, підтримку Паризької угоди про зміну клімату та поширеність чистих, економічних та стабільних енергетичних варіантів, викиди вуглекислого газу (CO₂), пов'язані з енергією, зростали в середньому на 1,3% щорічно протягом останніх п'яти років. Розрив між спостережуваними викидами та скороченнями, які необхідні для досягнення узгоджених на міжнародному рівні кліматичних цілей, збільшується.

Технології відновлюваної енергетики є домінуючими на світовому ринку нових потужностей, електрифікація транспорту показує ранні ознаки вибухового прискорення, а ключові технології, такі як створення батареї, відчувають швидке скорочення витрат. Впровадження відновлювальних рішень в енергоспоживаючих секторах, зокрема в будівництві й промисловості, все ще значно нижче необхідних рівнів, а прогрес в енергоефективності все ще повільний.

Структурні зміни також відіграють вирішальну роль у досягненні глобальних кліматичних цілей і забезпечують високий рівень енергоефективності, що на сьогодні є вкрай необхідним. Зміни включають модальні зрушення в транспорті (наприклад, від індивідуального автотранспорту до спільної мобільності та громадського транспорту), а також зусилля в промисловості, такі як циркулярна економіка та перенесення промисловості в райони, де рівень генерації відновлюваними джерелами енергії є значним.

Інвестиції в інфраструктуру повинні бути зосереджені на низьковуглецевих, стійких і довгострокових рішеннях, які охоплюють електрифікацію та децентралізацію. Необхідні інвестиції в інтелектуальні енергетичні системи, енергосистеми, інфраструктуру підзаряджування, зберігання, водневе господарство, централізоване опалення та охолодження в містах.

Практика циркулярної економіки може призвести до швидкого та легко реалізованого скорочення попиту на енергію та викиди. Темпи скорочення обсягів, повторного використання та утилізації використання води, металів, ресурсів, відходів сировини в цілому повинні бути пришвидшені. Зміни способу життя можуть сприяти більш глибокому скороченню викидів.

2) Відновлювані джерела енергії, підвищена електрифікація енергетичних послуг та енергоефективність можуть забезпечити понад 90% необхідного скорочення викидів CO₂, пов'язаних з енергією. Відновлювані джерела енергії та електрифікація забезпечують лише 75% скорочення викидів.

Частка ВДЕ у первинному енергопостачанні згідно стратегії REmap зростає з сьогоднішнього рівня менше ніж однієї шостої до майже двох третин у 2050 році. Процес зростання енергоефективності має бути значно інтенсифікований; темпи покращення енергоемності зростають до 3,2% на рік, порівняно з останніми історичними середніми показниками близько 2,0% на рік.

Електроенергія буде поступово ставати центральним енергоносієм, зростаючи з 20% кінцевого споживання до майже 50% частки до 2050 року, а відновлювана енергетика зможе забезпечити економічно більшу частину світового попиту на енергію (86%). Внаслідок цього загальне споживання електроенергії зростає більше ніж удвічі.

Перехід до все більш електрифікованих видів транспорту та тепла, у поєднанні із зростанням виробництва відновлюваної енергії, може забезпечити близько 60% скорочення викидів CO₂, пов'язаних з енергією, що є необхідним для виконання Паризької угоди. Коли ці заходи поєднуються з безпосереднім використанням відновлюваної енергії, частка скорочення викидів від цих комбінованих джерел досягатиме 75% від загального необхідного обсягу.

Біоенергетика (споживання палива) відіграватиме важливу роль у секторах, які важко електрифікувати, таких як судноплавство, авіація та окремі промислові процеси. Необхідними є зусилля для зменшення викидів парникових газів, не пов'язаних з викидами CO₂, та викидів неенергетичного використання; скорочення викидів промислового процесу; зменшення неорганізованих викидів у вугільній, нафтовій та газовій промисловості, у сільському та лісовому господарстві.

3) Глобальне перетворення енергії має економічний сенс.

Згідно з поточною та запланованою політикою, глобальний енергетичний сектор отримує сукупні інвестиції у розмірі 95 трлн. дол. США протягом періоду до 2050 р. Перехід до декарбонізованої глобальної енергетичної системи вимагатиме збільшення обсягу інвестицій в енергетичний сектор на 16% (додатково 15 трлн. дол. США до 2050 р.). В енергетичну систему буде інвестовано 110 трлн. дол. США, що становитиме у середньому 2% світового ВВП на рік за цей період.

Змінюватимуться види інвестицій, зміна складу інвестицій від сектору викопного палива до енергоефективності, відновлюваних джерел та інфраструктури. Необхідні додаткові інвестиції на 40% нижчі, ніж було оцінено в попередньому аналізі [24], в основному через швидке падіння витрат на відновлювану енергію та потенціал для подальшого їх скорочення. Нові технологічні рішення для електрифікації стають дешевшими та ефективнішими.

Якщо субсидії в енергетичному секторі становили щонайменше 605 млрд. дол. США у 2015 році та, за прогнозами, зростають до понад 850 млрд. дол., то за сценарієм REmap відбудеться зниження субсидій до 470 млрд. дол. у 2050 році. Типи субсидій різко зміняться, відходячи від викопного палива та технологій відновлюваної енергетики до технологій, необхідних для декарбонізації транспортного та промислового секторів. У сценарії REmap це призведе до кумулятивного скорочення субсидій на викопне паливо до 2050 року в розмірі 15 трлн. дол. США нижче того, що відбувалося б у випадку дії сценарію Reference Case, а також у чистому зменшенні на 10 трлн. дол. США.

В цілому заощадження від уникнутих субсидій та зменшення шкоди довкіллю і здоров'ю приблизно в 3–7 разів перевищують додаткові витрати з метою модернізації енергосистеми. У грошовому вираженні загальна сума заощадження, що виникає в результаті сценарію REmap, може становити від 65 трлн. до 160 трлн. дол. за період до 2050 р., тобто за кожний витрачений 1 дол. виплата буде становити від 3 до 7 дол.

4) Соціально-економічний вплив трансформації енергії вимірює чистий результат багаторазових взаємодій між трансформацією енергії та соціально-економічною системою.

Енергетичний перехід не можна розглядати окремо від більш широкій соціально-економічній системі. Для успішного переходу до відновлюваних джерел та технологій, політика повинна базуватися на більш інтегрованій оцінці взаємодії між енергетичним сектором, що розвивається, та економікою в цілому. До 2050 року перехід на ВДЕ згідно сценарію REmap призводить до відносного покращення ВВП і загальної зайнятості в економіці на 2,5% і 0,2% відповідно. У підсумку з 2019 по 2050 рр. приріст ВВП у випадку REmap у порівнянні з сценарієм Reference склав до 99 трлн. дол. Глобальний показник добробуту,

що вимірює сценарій REmap у порівнянні з сценарієм Reference, досягає в 2050 році значення 17%. Регіони з високою залежністю від експорту викопного палива та/або слабкими недиверсифікованими внутрішніми ланцюгами поставок будуть стикатися з викликом адаптації.

5) Соціально-економічний вплив трансформації енергетики значною мірою формується в рамках політики

Крім характеристик трансформації енергії (енергетичні баланси та інвестиції), багато інших внесків у політику можуть мати важливий вплив на соціально-економічний здобуток, зокрема, податки на викиди вуглецю та субсидії на викопне паливо.

Податки на викиди вуглецю на рівні, необхідному для досягнення цілі клімату глобального потепління на 2 °C, можуть мати як позитивний, так і негативний вплив залежно від політичних рамок, що супроводжують розгортання податків на викиди вуглецю.

6) Холістична політика зайнятості необхідна для того, щоб трансформація енергії мала позитивний внесок у цей аспект добробуту

У світовій економіці загальна зайнятість зростатиме у період між 2018 і 2050 рр. За двома сценаріями. Величина CAGR (Compound Annual Growth Rate – термін, який означає середньорічні темпи зростання з врахуванням складного відсотка) становитиме відповідно 0,45% і 0,46% відповідно. Сценарій REmap призводить до збільшення кількості робочих місць, ніж у сценарії Reference, причому відносний приріст досягається близько 2035 року і залишається близько 0,2% до 2050 року. Вплив сценарію REmap на зайнятість у енергетичному секторі є дуже позитивним, насамперед з появою нових робочих місць, пов'язаних з енергетичним переходом, значно переважаючи втрачені робочі місця в секторі викопного палива. Оскільки кількість робочих місць, пов'язаних з енергетикою, значно зростає, тоді як кількість робочих місць у загальній економіці майже не збільшується у порівнянні з базовим сценарієм (0,2% відносно збільшення у 2050 році).

7) Збитки від клімату матимуть значний вплив на соціально-економічний здобуток

Слід зазначити, що основні соціально-економічні результати (ВВП і робочі місця) не враховують впливу зміни клімату, що є рушійною силою застосування енергії в економіці. Використана макроекономічна модель припускає, що на економічну діяльність не впливає зміна клімату, отже в сценаріях Reference and REmap враховуються лише макроекономічні прогностичні показники. При уточненні можна стверджувати, що збитки від змін клімату до 2050 року призведуть до скорочення глобального ВВП на 15,5 % і 13,2 % відповідно. Незважаючи на цей високий вплив, світова економіка все ще характеризується значним зростанням через високі темпи зростання, досягнуті без кліматичних збитків у розглянутому соціально-економічному контексті: CAGR у період з 2019 по 2050 рік з кліматичними пошкодженнями становитиме 1,8 % і 2,0 % для сценарію Reference та REmap відповідно, у порівнянні з 2,4 % і 2,5 % без кліматичного ураження.

При порівнянні відносної продуктивності ВВП за сценаріями REmap та Reference, оскільки погіршення клімату мають більший вплив у сценарії Reference, ніж у сценарії REmap, що пов'язане з пом'якшенням впливу CO₂. Значне покращення досягається, коли погіршення клімату враховуються при аналізі: до 2050 р. впровадження кліматичних збитків призводить до збільшення показника соціально-економічного впливу (GDPREmap – GDPReference) / GDPReference з 2,5% до 5,3% (GDP – Gross Domestic Product; валовий внутрішній продукт).

У звіті агентства IRENA «Перетворення глобальної енергетичної системи: дорожня карта до 2050 року (видання 2019)» визначено шість основних напрямків, щодо яких потрібне ухвалення заходів представниками влади [25, 36]:

- 1) встановлення тісного взаємозв'язку між енергоефективністю та відновлюваною енергією;
- 2) планування енергетичного сектора, в якому висока частка енергії забезпечується завдяки відновлювальним джерелам;
- 3) підвищення використання електроенергії в транспортному, будівельному і промисловому секторах;
- 4) стимулювання інновацій в рамках всієї системи;
- 5) приведення соціально-економічних структур і інвестицій у відповідність з перетворенням;
- 6) гарантія справедливого розподілу витрат і вигод, пов'язаних з перетворенням.

Охарактеризуємо модель енергетичного переходу Європи на 100% ВДЕ [30]. Наукове дослідження, проведене Lappeenranta University of Technology (LUT) і Energy Watch Group, моделює повномасштабний перехід Європи на ВДЕ в електроенергетичному, теплопостачальних і транспортному секторі та секторі опріснення води до 2050 року. Результати дослідження опубліковані після чотирьох з половиною років збору даних, технічного і фінансового моделювання. Моделювання переходу Європи на відновлювані види енергії здійснено в рамках дослідження «Світова енергетична система, заснована на 100-відсотковому використанні ВДЕ, що фінансується Німецьким федеральним фондом навколишнього середовища (DBU) і фондом Stiftung Mercator. Даний звіт підтверджує, що перехід на 100% використання

ВДЕ в усіх секторах може бути здійснено і не призведе до підвищення витрат у порівнянні з існуючою сьогодні енергетичною системою, Європа може перейти на енергетичну систему з нульовими викидами. Основні висновки дослідження [30]:

- енергетичний перехід потребує проведення масштабної електрифікації в усіх енергетичних галузях. Сукупне виробництво електроенергії у 2050 році в 4–5 разів перевищить рівень 2015 року. У 2050 році на електроенергію буде припадати більше 85% попиту на первинну енергію. Одночасно викопні та ядерні види палива будуть повністю витіснені з усіх галузей;

- у системі, заснованій на 100-відсотковому використанні ВДЕ, виробництво електроенергії буде засновано на наступних видах джерел: фотоелектрична сонячна енергія (62%), вітрова енергія (32%), гідроенергія (4%), біоенергія (2%) і геотермальна енергія (<1%);

- у 2050 році на вітрову і сонячну енергію припадатиме до 94% сукупного виробництва електроенергії. Близько 85% відновлюваної енергії буде поставляти децентралізоване місцеве і регіональне виробництво. У зв'язку з цим зросте роль накопичувачів енергії, з їх допомогою буде забезпечуватися приблизно 17% споживання енергії та 20% споживання тепла;

- 100-відсоткове використання ВДЕ не веде до підвищення витрат: в перехідний період наведена вартість енергії (LCOE – Levelised Cost of Energy) для сталої енергетичної системи Європи залишається в діапазоні 50–60 євро / МВт·год;

- річний обсяг викидів парникових газів в Європі стабільно знижується протягом всього перехідного періоду в усіх секторах приблизно з 4200 MtCO₂ eq. в 2015 р до нуля в 2050 році;

- енергетична система, що повністю базується на відновлюваній енергії, надасть від 3 до 3,5 млн. робочих місць. Близько 800 тис. робочих місць в європейській вугільній промисловості на 2015 рік будуть ліквідовані до 2050 р., однак це компенсується створенням понад 1,5 млн нових робочих місць в секторі відновлюваної енергії.

Перехід на 100-відсоткову чисту, відновлювану енергію абсолютно реальний, вже зараз, з тими технологіями, які у нас є сьогодні. Серед рекомендованих звітом основних заходів названо сприяння з'єднанню секторів (sector coupling) та приватним інвестиціям, податкові пільги, законодавче стимулювання і одночасна відмова від субсидування виробництва вугілля і викопних видів палива.

3. Розвиток відновлюваної енергетики – світові орієнтири

Особливості розвитку світової відновлюваної енергетики проілюструємо даними агентства IRENA та Bloomberg New Energy Finance (BNEF) [16, 18–20, 35, 39]. За даними BNEF зміна пропорції ВДЕ в електрогенерації за період з 2007 по 2017 рр. по окремих країнах складає (у відсотках): Канада – з 61 до 66; Великобританія – з 5 до 33; Німеччина – з 14 до 36; Китай – з 15 до 27; США – з 8 до 17; Іспанія – з 19 до 34; Італія – з 16 до 52; Японія – з 9 до 17; Бразилія – з 88 до 81; Індія – з 18 до 19; Австралія – з 8 до 20.

Світовий рекорд мінімальної вартості генерації 1 кВт·год електроенергії ВДЕ в дол. США без субсидування у порівнянних цінах для 2011 та 2018 років представлено в табл. 1 [19, 35].

Таблиця 1

| Тип | Країна, учасник торгів | 2011 р. | Країна, учасник торгів | 2018 р. | Зменшення вартості, рази |
|------------|------------------------|---------|------------------------|---------|--------------------------|
| СЕС | Іспанія, Various | 0,17 | Мексика, Enel | 0,0197 | 8,63 |
| ВЕС, оншор | США, Various | 0,08 | Мексика, Neoen | 0,0177 | 4,52 |
| ВЕС, офшор | Велика Британія, SSE | 0,17 | Данія, Vattenfall | 0,053 | 3,21 |

Глобальні нові інвестиції в екологічно чисту енергію, за секторами за період з 2005 по 2018 рр., в млрд. дол., наведено в табл. 2 [16].

Для порівняння, нові інвестиції в екологічно чисту енергетику США та Європи в 2005 – 2018 рр., в млрд. дол., зведено в табл. 3 [16]. За підсумками 2018 року встановлена потужність ВДЕ у світі досягла 2351 ГВт, що на 7,9% більше, ніж у 2017 р.. Відновлювальна енергетика представляє приблизно третину всіх генеруючих потужностей на планеті. Половина ВДЕ-потужностей припадає на гідроенергетику (1172 ГВт), встановлена потужність вітроенергетики становить 564 ГВт, а сонячної енергетики 480 ГВт. Розподіл приросту потужності ВДЕ у 2018 р. по регіонах та їх порівняння з 2017 р. наведено в табл. 4.

Основні факти про розвиток ВДЕ в 2018 році в розрізі технологій [19, 39].

Гідроенергетика. У 2018 р. зростання гідроенергетики продовжувало сповільнюватися, і тільки Китай додав у 2018 р. значні нові потужності (+8,5 ГВт).

Таблиця 2

| Тип | Рік | | | | | | | | | | | | | |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 |
| СЕС | 16 | 22 | 39 | 62 | 64 | 103 | 158 | 140 | 120 | 145 | 179 | 141 | 171 | 131 |
| ВЕС | 28 | 40 | 61 | 75 | 80 | 102 | 87 | 84 | 86 | 111 | 125 | 121 | 125 | 129 |
| Інші | 34 | 68 | 82 | 69 | 62 | 70 | 77 | 64 | 61 | 63 | 55 | 66 | 65 | 71 |

Вітроенергетика. Глобальна потужність вітроенергетики збільшилася на 49 ГВт в 2017 р. На частку Китаю та США, як і раніше, припадала найбільша частка розширення вітрової енергії, зростання на цих ринках склало 20 ГВт і 7 ГВт відповідно.

Біоенергетика. Розвиток скромний. На три країни (Китай, Індію та Великобританію) припадало більше половини розширення біоенергетичних потужностей у 2018 р. Китай наростив потужності біоенергетики на 2 ГВт, Індія на 700 МВт, Великобританія на 900 МВт

Таблиця 3

| Регіон | Рік | | | | | | | | | | | | | |
|--------|------|------|------|------|------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 |
| США | 16,5 | 34,6 | 47,1 | 43,6 | 35,1 | 46,6 | 62,3 | 52,9 | 44,6 | 52,2 | 58,4 | 56,4 | 57,6 | 64,2 |
| Європа | 38,9 | 52,5 | 75,2 | 88,3 | 91,3 | 123,1 | 137,8 | 98,4 | 70,2 | 78,5 | 73,8 | 77,7 | 58,4 | 74,5 |

Таблиця 4

| Регіон | Потужність, в ГВт | Частка у глобальній генерації, у відсотках | Приріст (абсолютні зміни), в ГВт | Приріста, у відсотках |
|------------------------------|-------------------|--|----------------------------------|-----------------------|
| Північна Америка | 366 | 16,0 | 19,0 | 5,4 |
| Центральна Америка та Каріби | 15 | 1,0 | 0,8 | 5,5 |
| Південна Америка | 211 | 9,0 | 9,4 | 4,7 |
| Європа | 536 | 23,0 | 24,0 | 4,6 |
| Середній Схід | 20 | 1,0 | 1,3 | 7,1 |
| Африка | 46 | 2,0 | 3,6 | 8,4 |
| Євразія | 100 | 4,0 | 4,1 | 4,3 |
| Азія | 1024 | 44,0 | 105,0 | 11,4 |
| Океанія | 32 | 1,0 | 4,8 | 17,7 |

Сонячна енергетика – найдинамічніший сегмент не тільки ВДЕ, але електроенергетики в цілому. Встановлена потужність сонячної енергетики зросла у 2018 р. на 94 ГВт, у тому числі в Азії було побудовано 64 ГВт.

Геотермальна енергетика у 2018 р. зросла на 539 МВт, причому більша частина розширення припала на Туреччину (+219 МВт) та Індонезію (+137 МВт), за якою слідують США, Мексика і Нова Зеландія.

Компанія Bloomberg NEF опублікувала свій прогноз в галузі енергетики на 2019 рік. Незважаючи на можливе уповільнення розвитку сонячної енергетики в Китаї, у 2019 році вона додасть від 125 до 141 ГВт потужностей; зростання буде відзначено в Індії, Європі, Близькому Сході, Північній Африці, Туреччині. У вітроенергетиці BNEF очікує стрибок з 53,5 ГВт нових потужностей в 2018 році до понад 70 ГВт в 2019 році, причому стрибок відбудеться і в морській вітроенергетиці: буде додано 8,5 ГВт нових потужностей проти 4,8 ГВт в 2018 році. У 2019 вперше в історії ринку річний обсяг встановлених накопичувачів енергії перевищить 10 ГВт-год. Продажі електромобілів в 2019 році зростуть на 40% (в 2018 році продажі виросли на 70%). У 2019 р. у світі буде продано 2,6 млн. електрокарів, з яких 1,5 млн. буде реалізовано в Китаї.

За дослідженнями, здійсненими IRENA [21, 31, 32, 34], у 2018 році у світі було введено в експлуатацію 171 ГВт ВДЕ-електростанцій, що дещо менше, ніж в 2017 р. [32]. СЕС та ВЕС забезпечили 84% приросту потужностей ВДЕ у 2018 р. У регіональному розрізі лідирує Азія, де було встановлено 61% нових потужностей, що функціонують на основі ВДЕ. З 2015 року у світі щорічно будується більше відновлюваної генерації, ніж іншої, що працює на основі викопного палива, в тому числі атомної енергетики. За підсумками 2018 року встановлена потужність ВДЕ у світі досягла 2351 ГВт, що на 7,9% більше, ніж роком раніше. Тепер відновлювальна енергетика представляє приблизно третину всіх

генеруючих потужностей на планеті. Половина ВДЕ-потужностей припадає на гідроенергетику (1172 ГВт), встановлена потужність вітроенергетики становить 564 ГВт, а сонячної енергетики 480 ГВт. Однак вітрова та сонячна енергетика є найбільш зростаючими з великим відривом секторами ВДЕ.

У 2018 році частка ВДЕ у виробництві електроенергії в ЄС значно зросла []. Генерація «мікс» в ЄС у 2018 році та порівняння з 2017 р. (наведено в дужках) у відсотках: ядерна енергетика – 25,5 (25,5); газ – 18,9 (19,9); кам'яне вугілля – 10,0 (11,0); лігніти – 9,2 (9,5); інші види палива – 4,0 (4,1); ВДЕ – 32,3 (30,0), у тому числі вітрова – 11,8 (11,1); сонячна – 3,9 (3,6); біомаса – 6,1 (5,9); гідро – 10,6 (9,4).

Опубліковано дослідження електроенергетики ЄС, проведене центрами Agora Energiewende (Німеччина) і Sandbag (Великобританія), яке показує, що частка ВДЕ в генерації в ЄС досягла 32,3%, що відповідає зростанню більш ніж на 2 % у порівнянні з 2017 р. [37]. Нові ВЕС та СЕС, а також генерація на біомасі потіснили вугілля в структурі виробництва електроенергії, особливо в Німеччині, Великобританії та Франції. У той же час використання гідроенергетики повернулося до свого нормального рівня, що дозволило знизити вироблення електроенергії на основі природного газу. Як результат, виробництво електроенергії на основі вугілля в ЄС у 2018 р. впало на 6%, причому в порівнянні з 2012 р. воно знизилося на 30%.

У 2018 р. сонячна енергетика зросла приблизно на 10 ГВт (найсильніше зростання за останні роки, при цьому на частку ЄС сьогодні припадає менше 10% світового ринку), а її частка у виробленні електроенергії склала 3,9%. У ряді країн сонячна генерація була набагато вищою: в Італії – трохи менше 9%, в Греції – трохи менше 8%, в Німеччині – близько 7%. За оптимістичним прогнозом ринок сонячної енергетики (річе введення нових потужностей) може вирости до 30 ГВт до 2022 року. Основна причина – зниження вартості модулів: у 2018 році вони були на 29% дешевше, ніж у 2017 році.

Обсяги генерації електроенергії в країнах ЄС28 за різними видами первинного енергоносія (в ТВт·год) наведено в табл. 5.

Таблиця 5

| Тип енергоносія | Рік | | | | | | | |
|-----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 |
| ВДЕ | 679 | 768 | 858 | 900 | 936 | 951 | 977 | 1051 |
| Ядерна | 907 | 882 | 877 | 876 | 857 | 840 | 831 | 829 |
| Лігніти | 343 | 347 | 332 | 324 | 322 | 306 | 308 | 300 |
| Кам'яне вугілля | 496 | 544 | 531 | 473 | 462 | 386 | 358 | 324 |
| Газ | 705 | 584 | 511 | 458 | 497 | 610 | 649 | 614 |
| Інші види | 143 | 140 | 130 | 129 | 131 | 132 | 134 | 131 |
| Разом | 3273 | 3265 | 3239 | 3160 | 3205 | 3225 | 3257 | 3249 |

Зазначимо важливість розвитку концентраторів сонячної енергії – CSP (Concentrated solar power) із зберіганням енергії в набагато більших, ніж сьогодні, обсягах через її спроможності забезпечувати енергію 24 год. на добу – цей ринок повинен зрости з 3 ГВт в 2020 році до 78 ГВт в 2030 році. Передбачається, що до 2050 року 64–65 % всієї електроенергії буде надходити від змінних ВДЕ (сонце і вітер), 27–29 % – з диспетчеризованих ВДЕ (CSP, біоенергетика, гідроенергетика та геотермальна енергетика), а залишок буде вироблятися з водню.

Коротко проаналізуємо стан використання ВДЕ в Німеччині, що є флагманом комплексної реалізації політики енергетичного переходу. У табл. 6 наведемо зміну структури попиту на первинну енергію в Німеччині, 2007 – 2017 рр. (у відсотках) [37, 41].

Баланс виробництва електроенергії в Німеччині в 2018 р. (млрд. кВт·год / відсоток) становив: натуральний газ – 83,0/13,0; кам'яне вугілля – 83,0/13,0; ядерна енергія – 76,1/11,9; лігніти – 146,0/22,8; ВДЕ – 225,7/35,2; інші види – 26,9/4,2; всього електроенергії в 2018 р. вироблено – 640,7 млрд. кВт·год/100, при цьому ГЕС – 16,5/2,6; СЕС – 46,2/7,2 %; біомаса – 51,3/8,0; ВЕС офшори – 19,3/3,0; ВЕС оншори – 92,2/14,4.

Таблиця 6

| Тип енергоносія | 2007 р. | 2017 р. | Δ |
|-----------------|---------|---------|-------|
| Газ | 23,0 | 23,1 | + 0,1 |
| Нафта | 35,3 | 35,8 | + 0,5 |
| Вугілля | 26,1 | 21,3 | - 4,8 |
| АЕС | 9,6 | 5,1 | - 4,5 |
| ВДЕ | 4,6 | 13,4 | + 8,8 |
| Гідро | 1,4 | 1,3 | - 0,1 |

Установлена потужність ВДЕ в Німеччині у 2018 р. зросла на 6,6 ГВт. Після рекордного в 2017 р. зростання за весь час на 8,2 ГВт потужностей, у 2018 р. мало місце введення нових потужностей ВЕС на 3,2 ГВт, з них 1 ГВт як офшорні ВЕС (на кінець 2018 р. потужність ВЕС в Німеччині становила 59 ГВт). Потужність СЕС у 2018 р. зросла на 2,9 ГВт, що більше на 1,2 ГВт у порівнянні з 2017 р. Загальна потужність СЕС на кінець 2018 р. становила 45,3 ГВт. У секторі використання біомаси нових потужностей було встановлено на рівні 419 МВт.

У 2019 р. в Німеччині встановили новий рекорд виробництва електроенергії з відновлюваних джерел [14]. У першому півріччі 2019 р. в Німеччині частка електроенергії гідро-, сонце-, вітроенергетики та з біомаси перевищила сумарну генерацію ТЕС та АЕС. Причин цього дві й вони досить своєрідні. Цього року перше півріччя видалося вкрай сприятливим для вітрової та сонячної енергетики – спочатку було вітряно, а вже потім дуже сонячно. У підсумку 47,3 % обсягу електроенергії, яку споживачі отримували, припало на "зелену енергетику", а 43,4 % – на генерацію ТЕС та АЕС. За даними Інституту сонячно-енергетичних систем Товариства імені Фраунгофера спалення газу дало 9,3 % до енергобалансу, а решта 0,4 % припало на інші джерела, в тому числі й нафту.

За даними аналітичного центру Agora Energiewende причин такої ситуації чимало й склалася вона лише на цей конкретний момент, тож говорити про тривалу тенденцію поки передчасно. Перша половина 2019 року виявилась особливо вітряною: в результаті обсяги електроенергії, виробленої вітряками, зросли приблизно на 20 % у порівнянні з відповідним періодом 2018 р. Водночас генерація електроенергії з використанням СЕС зросла на 6 %, а на газових ТЕС – на 10 %. Частка АЕС в загальному енергобалансі Німеччини практично не змінилася, а вугілля – скоротилася. У порівнянні з першим півріччям 2018 року, у 2019 р. з кам'яного вугілля генерували на 30 %, а з бурого – на 20 % менше електроенергії. Деякі блоки вугільних електростанцій взагалі тимчасово вивели з експлуатації.

Внаслідок зростання цін на шкідливі викиди «парникових газів» в атмосферу генерація електроенергії з вугілля обходиться енергоконцернам дедалі дорожче. Ціни на емісійні квоти особливо стрімко зросли в Німеччині після реформи правил торгівлі цими квотами, проведеної 2017 року. Ринок цих квот стосується поки що лише ТЕС та енергоємних галузей промисловості.

Відзначаються також вигоди від газових електростанцій. Як сировина газ, зазвичай, дорожчий за вугілля. Однак у першій половині 2019 р. ціни на газ у регіоні були низькими, тож електростанції, що спалюють «блакитне паливо», виявилися більш прибутковими. 29 червня 2019 року ціна на газ на голландському торговому майданчику TTF становила близько 10 євро за 1 МВт·год, а роком раніше – майже 20 євро. За даними Федерального об'єднання підприємств енерго- і водопостачання (BDEW – Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft), однією з причин падіння цін на газ стала порівняно тепла зима, внаслідок чого у сховищах залишилося ще багато газу. Крім того, в Європі з'явилися кілька нових терміналів для прийому поставок скрапленого природного газу з інших континентів. Свою роль зіграло й сповільнення темпів економічного зростання та нинішні торговельні конфлікти в світі, що також позначилося на світовій вартості газу. Як наслідок, багато надлишкового газу стали експортуватися до ЄС, де його ціни порівняно високі.

Істотним фактором стало й те, що спорудження вугільних ТЕС обходиться значно дорожче. А однією з переваг газових ТЕС є можливість досить гнучко змінювати навантаження на них, чого швидко не зробити на вугільних ТЕС. За даними BDEW, у першій половині 2019 р. цей показник був приблизно на 15 % нижчим, ніж за аналогічний період 2018 року.

4. Законодавче та нормативно-правове регулювання діяльності ринків електроенергії Європейського Союзу

Важливо проаналізувати політичні та законодавчі орієнтири європейської політики реалізації енергетичного переходу [2, 4, 5, 15].

Перший етап реформування енергетичних ринків країн-членів ЄС почався з прийняття 26 червня 1990 р. Директиви 90/377/ЄЕС щодо функцій Співтовариства з розвитку конкуренції та прозорості цін на електроенергію для кінцевих споживачів. Директива зобов'язала країни-члени ЄС надавати Статистичному бюро Європейського Співтовариства (Eurostat) відкриту інформацію з динаміки ринкових цін на електроенергію. Подальші заходи з регулювання діяльності систем передавання, транзиту та організації постачання електроенергії було визначено Директивою 90/547/ЄЕС від 29 жовтня 1990 р.

Основним завданням першого етапу реформування (лібералізації), за визначенням Єврокомісії, було – «більше конкуренції, наскільки це можливо, і стільки регулювання, наскільки це необхідно» («as much competition as possible, as much regulation as necessary»). Відкриття ринків визначалося національними нормативно-правовими актами. Єдиним обов'язковим критерієм, на рівні ЄС, визначалась необхідність доведення реалізації на відкритому ринку як мінімум 35% щорічного обсягу споживання електроенергії кінцевими споживачами протягом 5 років.

Другий етап. У листопаді 2002 р. було прийнято Другий енергетичний пакет, положення якого

спрямовано головним чином на забезпечення вільного доступу до мереж і подальшого розвитку конкурентного середовища. До Другого енергетичного пакету входять наступні законодавчі та нормативно-правові документи:

- Директива Європейського Парламенту та Ради 2003/54/ЄС від 26 червня 2003 р. щодо загальних правил для внутрішнього ринку електроенергії;
- Регламент Ради та Європейського Парламенту № 1228/2003 від 26 червня 2003 р. про умови доступу до мереж з метою транскордонного обміну електроенергією;
- Директива Європейського Парламенту та Ради 2003/55/ЄС від 2003 р. про загальні правила для внутрішнього ринку природного газу;
- Регламент (ЄС) №1775/2005 від 2005 р. про умови доступу до мереж транспортування природного газу.

У цілому Другим енергопакетом передбачено подальшу лібералізацію енергетичного сектора. На цьому етапі мінімальними вимогами були юридичне розділення операторів систем передавання енергії та операторів, які продають енергію кінцевим споживачам, а також створення регулюючого органу на національному рівні в кожній країні.

Третій етап. У 2009 р. Європейським Парламентом було затверджено Третій пакет енергетичного законодавства ЄС для забезпечення більш повної лібералізації енергетичного ринку, насамперед у електроенергетичному та газовому секторах. До складу Третього Енергетичного пакету увійшли:

- Директива 2009/72/ЄС, якою встановлено основні засади та правила внутрішнього ринку електроенергії (скасовує Директиву 2003/54/ЄС);
- Директива 2009/73/ЄС щодо загальних правил для внутрішнього ринку природного газу (скасовує Директиву 2003/55/ЄС);
- Регламент ЄС №713/2009, яким засновано Агентство з питань співпраці регуляторів енергії (Agency for the Cooperation of Energy Regulators – ACER);
- Регламент ЄС №714/2009 про умови доступу до мереж трансграничного обміну електроенергією (скасовує Регламент ЄС №1228/2003);
- Регламент ЄС №715/2009 про умови доступу до мереж транспортування природного газу (скасовує Регламент ЄС №1775/2005).

Положення зазначених нормативно-правових актів спрямовано не лише на сталий розвиток внутрішнього електроенергетичного ринку, а й на гармонізацію спільного функціонування вже діючих національних електроенергетичних ринків.

У сфері енергетики Європа поставила перед собою три питання: (1) як побудувати низькоємісійну енергетику, яка буде відповідати постійному збільшенню потреб споживачів; (2) як забезпечити енергетичну безпеку; (3) як забезпечити продаж енергії за конкурентною ціною. Європейський Союз визначив надзвичайно амбітні цілі в формі ініціативи «20-20-20 до 2020» в рамках «Пакету дій по боротьбі зі зміною клімату і використанням відновлюваної енергії» (The new energy and climate package of the European Commission). Країни-члени до 2020 року взяли на себе зобов'язання скоротити викиди CO₂ принаймні на 20%, запровадити 20% виробництва енергії з відновлюваних джерел і досягти 20% покращення енергоефективності.

Енергетична стратегія ЄС на 2011–2020 роки «Енергетика 2020: Стратегія для конкурентної, сталої і безпечної енергетики» базується на п'яти пріоритетних зонах:

- 1) досягнення енергоефективності в Європі;
- 2) побудова панєвропейського об'єднаного енергетичного ринку;
- 3) розширення прав споживачів і досягнення найвищого рівня захисту та безпеки;
- 4) зростання лідерства Європи в питаннях енергетичних технологій та інновацій;
- 5) посилення зовнішнього виміру європейського енергетичного ринку.

Четвертий етап – Четвертий енергопакет (Winter energy package) розглядається як елемент стратегії створення Європейського Енергетичного Союзу. Організація впровадження основних положень стратегії ЄС Енергетика 2020 (базового документу розвитку енергетики Євросоюзу) стало основою для прийняття Європарламентом Європейської стратегії енергетичної безпеки, як невід'ємної частини Рамкової Кліматичної та енергетичної політики на період з 2020 до 2030 рр. Європейською Комісією (ЄК), вищим органом виконавчої влади Європейського Союзу, 25 лютого 2015 р. прийнято Пакет документів Енергетичного Союзу COM(2015) 80 Рамкова стратегія для сильного Енергетичного Союзу з прогресивною політикою щодо клімату (Стратегія Енергетичного Союзу – Energy Union Package) та «Дорожню карту для Енергетичного Союзу до 2050 р.» (Energy Roadmap 2050), в якій представлені конкретні цілі та пріоритети з планом дій щодо прийняття відповідної законодавчої бази до 2018 р.

На саміті 24–25 жовтня 2014 р. главами держав і урядів країн-членів ЄС прийнято основні принципи, представлені Єврокомісією Європейському Парламенту та Раді «Energy Efficiency and its contribution to energy security and the 2030 Framework for climate and energy policy» (COM(2014) 520,

23.07.2014), щодо енергетичної політики з енергоефективності та протидії змінам клімату на період до 2030 р. [2, 5]. Цілями цієї політики для країн-членів ЄС визначено: зниження викидів парникових газів на 40%, покращення енергоефективності на 27% і підвищення на 27% використання ВДЕ в енергетичній структурі Євросоюзу, що значно перевищує раніше прийняті відповідні показники в Енергетичній стратегії ЄС до 2020 р. Стратегія Енергетичного Союзу ЄС до 2030 р. має п'ять взаємопов'язаних положень, спрямованих на підвищення рівня енергетичної безпеки, сталого розвитку та конкурентоспроможності, викладених у «Пакеті Енергетичного Союзу»:

- енергетична безпека, солідарність і довіра;
- повністю інтегрований європейський енергетичний ринок;
- внесок ефективного використання енергії в скорочення обсягу споживання;
- низьковуглецева економіка;
- дослідницька діяльність, інноваційні розробки та конкурентоспроможність

Основними цілями та пріоритетами Енергетичного Союзу передбачено: створення єдиної архітектури ринку електроенергії; сприяння успішній ринковій інтеграції електроенергії, що генерується ВДЕ; забезпечення подальшого підвищення енергоефективності європейської економіки. Для розв'язання цих проблем Єврокомісією було й розпочато підготовку до прийняття нового енергетичного пакету Winter energy package. Концепція Четвертого енергопакету викладена в доповіді Єврокомісії «Чиста енергія для всіх європейців» (Clean Energy for All Europeans, COM(2016) 860 final, 30.11.2016) [15]. Документ відображає бачення, за яким сценарієм ЄС може здійснити перехід до нового енергетичного майбутнього.

У цілому Четвертим енергопакетом визначено три основні цілі: (1) досягнення глобального лідерства у сфері ВДЕ; (2) забезпечення кращих умов для споживачів; (3) пріоритетність енергоефективності. Наразі сформована система пропозицій та заходів, що охоплюють питання підвищення енергоефективності, децентралізації генерації, прискорення інновацій у сфері чистої енергії і модернізації будівель та екодизайну, розвитку ВДЕ, структури ринку електроенергії, правил постачання та регулювання для Енергетичного Союзу.

Новий енергетичний пакет «Clean Energy for All Europeans» відображає бачення того, за яким сценарієм ЄС може здійснити перехід до нового енергетичного майбутнього [15]:

1) Єврокомісія пропонує після 2020 р. скасувати правило, за яким установки, що генерують електроенергію з ВДЕ (вітер, сонце тощо), мають право першочергового включення до електромережі. Частка «зеленої» генерації в ЄС на кінець 2016 р. досягла 30%, і це вже показник того, що сектор «дозрів» до конкуренції з іншими виробниками і його розвиток більше не потребує державної підтримки.

2) очікується зростання залученості споживачів до енергоринку, довгострокова мета ЄС за часткою ВДЕ в споживанні становить 50%. Це зумовлює необхідність вирішити ще одне важливе питання: як забезпечити маневрування пікового споживання, яке зараз здійснюється за рахунок ТЕС. Новий етап розвитку енергоринку Єврокомісія бачить у переході від централізованих систем до систем РГ, де енергетичні кооперативи і окремі домогосподарства перетворюються в активних учасників ринку (prosumer та prosumage) і мають можливість генерувати, зберігати та використовувати для власного споживання електроенергію з ВДЕ;

3) зростання кінцевих показників (мети) з енергоефективності. Це питання нового «енергопакету» підтримують усі сторони процесу – Єврокомісія, Європарламент, представники бізнесу, експерти. На сьогоднішній планка приросту в енергоефективності до 2030 р. встановлена на рівні 27% від прогнозу рівнів енергоспоживання-2030, зробленого у 2007 р. Єврокомісія пропонує збільшити мету до 30%. На думку ж Європарламенту, на 2030 рік мета повинна бути більш амбітною та складати не менше 40%.

Реалізація пропозицій нового пакету може забезпечити щорічне зростання обсягу ВВП ЄС на 1% протягом 2020–2030 рр. і створення 900 тис. нових робочих місць, залучаючи до 177 млрд. євро річних державних і приватних інвестицій починаючи з 2021 року.

Масштабний перехід від традиційного способу генерації, розподілу та керування енергоресурсами до нової енергосистеми майбутнього передбачає застосування широкого спектру цифрових рішень, наприклад, таких як штучний інтелект, машинне навчання, Internet of Things, блокчейн і Big data. Другим аспектом в контексті енергетики майбутнього постає перехід до безвуглецевих паливних систем.

5. Реалізація положень енергетичного переходу в Україні

Як вихідні дані для оцінки спроможності України реалізувати положення енергетичного переходу наведемо порівняння структур виробництва електроенергії в 2018 р. в Німеччині та Україні (у відсотках) [12, 33, 42, 43]:

1) Німеччина: АЕС – 13,0; ТЕС вугільна – 39,1; ГЕС + ГАЕС – 4,0; ТЕС регулюючі на газу – 9,0; ВДЕ – 34,9;

2) Україна: АЕС – 55,0; ТЕС + ТЕЦ вугільні – 29,9; ГЕС + ГАЕС – 6,8; ТЕЦ базові на газу – 7,1; ВДЕ – 1,2.

Встановлена потужність об'єктів відновлюваної енергетики України, що працюють за «зеленим» тарифом, МВт (із врахуванням СЕС домогосподарств; станом на 01.01.2019 р.) наведено в табл. 7.

За останні 4 роки (період 2015–2018 рр.) політика енергоефективності та впровадження ВДЕ в нашій країні відзначилася суттєвими здобутками [10]:

– 6 млрд. м³ газу у рік зменшено у 2018 р. у порівнянні з 2014 р. такими категоріями, як населення, бюджетна сфера та теплокомуненерго, тобто близько 1,2 млрд. євро у рік заощаджено на закупівлі імпортного газу;

– запроваджено монетизацію субсидій – ще один стимул та джерело для заощадження енергоресурсів;

– у 10 разів зросла кількість укладених енергосервісних (ЕСКО) контрактів у 2018 р. порівняно із 2016 р. (у 2018 р. підписано 210 ЕСКО-договорів на суму контрактів понад 200 млн. грн.);

– у 3 рази збільшено кількість місцевих органів влади, де впроваджено енергомоніторинг у бюджетній сфері: із 60 таких органів влади у квітні 2017 р. до 180 на кінець 2018 року;

– фактично за півроку із закладами вищої освіти видано майже 450 атестатів для енергоаудиторів та фахівців з обстеження інженерних систем (згідно Закону України «Про енергетичну ефективність будівель»);

– близько 7,5 тис. українських родин інвестували 151 млн. євро у СЕС загальною потужністю майже 160 МВт; більше половини усіх СЕС (майже 4500 МВт) інсталювано саме у 2018 році; ТОП-5 областей, де встановлено найбільше СЕС у домогосподарствах: 882 – Дніпропетровська; 838 – Київська; 664 – Тернопільська; 484 – Івано-Франківська; 469 – Кіровоградська;

– у 3 рази зросли біогазові потужності: із 10 установок (15 МВт) на кінець 2014 р. до 33 установок (46 МВт) на кінець 2018 року.

Таблиця 7

| Тип генерації | Рік | | | | | |
|---------------------|------|------|------|------|------|-------------|
| | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | I пів. 2019 |
| СЕС | 411 | 432 | 531 | 742 | 1388 | 2640 |
| СЕС домогосподарств | 0,1 | 2 | 17 | 51 | 157 | 190 |
| ВЕС | 426 | 426 | 438 | 465 | 533 | 777 |
| МГЕС | 80 | 87 | 90 | 95 | 99 | 100 |
| Біомаса | 35 | 35 | 39 | 39 | 51 | 51 |
| Біогаз | 15 | 17 | 20 | 34 | 46 | 66 |
| Разом | 967 | 999 | 1135 | 1426 | 2274 | 3824 |

«Зелена» генерація вимагає забезпечення високоманевреної резервної потужності з надійним і чітким графіком роботи: чим більше таких «зелених» електростанцій у загальній структурі генерації, тим більше необхідно мобільних резервів. Частка «зеленої» генерації в Україні поки що мінімальна і складає до 2% від загального обсягу генерованої у країні електроенергії та сьогодні не впливає на енергосистему країни.

Частка та потужність об'єктів ВДЕ суттєво змінилися в останні роки. Так, якщо в 2014 р. вони становили 1,1 % та 0,9 ГВт, то в 2018 році вони склали 2,4 % та 2,3 ГВт.

За даними Держенергоефективності за 2018 рік встановлено 813 МВт нових потужностей, що генерують електроенергію з ВДЕ. Це майже у 3 рази більше, ніж обсяг потужностей, введених у 2017 р. (близько 300 МВт). У встановлення 813 МВт потужностей об'єктів відновлюваної електроенергетики інвестовано понад 730 млн. євро. Загалом, на кінець 2018 р. в країні працювало 2240 МВт потужностей, які генерують «чисту» електроенергію, що у 1,5 рази більше, ніж на кінець 2017 року (близько 1500 МВт). З іншої сторони, за даними НЕК «Укренерго» на початку 2019 р. встановлена потужність ВЕС та СЕС в енергосистемі країни сумарно складає 1353 МВт (ВЕС – 512 МВт, СЕС – 841 МВт), що мало впливає на баланс, і відхилення їх генерації від запланованої компенсується існуючими маневровими потужностями ТЕС ГК, ГЕС та ГАЕС.

Міненерговугілля прогнозує в 2019 р. зростання виробництва електроенергії з ВДЕ у 2,2 рази, незначне зниження генерації АЕС і ГК ТЕС [41, 43]. Виробництво електроенергії в ОЕС України в 2019 році знизиться на 0,74% (на 1 млрд. 177,9 млн. кВт·год) порівняно з 2018 роком – до 158 млрд. 173 млн. кВт·год, свідчить оновлений прогнозний баланс електроенергії ОЕС Міністерства енергетики та вугільної промисловості [43].

АЕС за підсумками 2019 року зменшать виробництво електроенергії на 1,2% (на 1,008 млрд. кВт·год) – до 83,390 млрд. кВт·год. ГК ТЕС, у свою чергу, продемонструють падіння виробництва на 2,5% (на 1 млрд. 204,5 млн. кВт·год) – до 46,587 млрд. кВт·год, ГЕС – на 23,2% (на 2 млрд. 428,0 млн. кВт·год), до 8,001 млрд. кВт·год, ГАЕС – на 8,7% (137,4 млн. кВт·год), до 1,442 млрд. кВт·год. Виробництво

електроенергії на ТЕЦ і когенераційних установках (КУ) за підсумками року зростає на 6,6% (на 728,2 млн. кВт·год) – до 11,744 млрд. кВт·год, на блок-станціях – на 6,5% (97,0 млн. кВт·год), до 1,6 млрд. кВт·год. Прогнозується, що за підсумками 2019 року виробництво електроенергії з ВДЕ становитиме 5,979 млрд. кВт·год, що в 2,3 рази (на 2 млрд. 633 млн. кВт·год) більше, ніж у 2018 році.

Структура виробництва електроенергії в ОЕС України в 2018 р., прогноз на 2019 р. представлена в табл. 8.

За даними Національної комісії, що здійснює держрегулювання у сферах енергетики і комунальних послуг [13, 43], в Україні за перше півріччя 2019 р. введено в дію потужності «зеленої» енергетики, яка виробляє 656 МВт. У порівнянні з 2018 роком, це в шість разів більше, ніж за аналогічний період минулого року. Усього в II кв. 2019 р. введено 71 МВт потужностей ВЕС і 568,3 МВт – СЕС, а також 16 МВт біогазових установок. Станом на кінець першого півріччя 2019 р. встановлена потужність об'єктів ВДЕ досягла 3634,4 МВт, у тому числі СЕС – 2640,4 МВт, ВЕС – 776,6 МВт, установок на біомасі – 51,3 МВт, біогазі – 66,4 МВт.

Лідером за кількістю введених в експлуатацію потужностей виявилася Запорізька область (152 МВт). Далі йдуть: Миколаївська (132 МВт), Київська (76,3 МВт), Дніпропетровська (49,1 МВт), Вінницька (40,2 МВт) та інші області [8, 10, 43]. Найменше потужностей запустили у Тернопільській області (4,7 МВт). Україна у січні–березні 2019 р. ввела 861,1 МВт ВДЕ, що в 5,4 рази більше, ніж за аналогічний період 2018 року, і на 16% більше, ніж за весь 2018 рік.

Таблиця 8

| Виробники електроенергії | 2018 | 2018 | 2019 | 2019 | вим. | вим. |
|---|--------------|--------------------------------------|--------------|--------------------------------------|--------------|--------|
| | Млн. кВт·год | частка від загального виробництва, % | Млн. кВт·год | частка від загального виробництва, % | Млн. кВт·год | % |
| АЕС | 84398,2 | 53,0 | 83390 | 52,7 | -1008,0 | -1,2 |
| ГК ТЕС | 47791,5 | 30,0 | 46587 | 29,5 | -1204,5 | -2,5 |
| ТЕЦ і КУ | 11016,2 | 6,9 | 11744 | 7,4 | +728,2 | +6,61 |
| ГЕС | 10429,0 | 6,5 | 8001 | 5 | -2428,0 | -23,28 |
| ГАЕС | 1579,4 | 1,0 | 1442 | 0,9 | -137,4 | -8,7 |
| Блок-станції | 1503,6 | 0,9 | 1600 | 1 | +097,0 | +6,5 |
| Альтернативні джерела (ВЕС, СЕС, біомаса) | 2633,0 | 1,7 | 5979 | 3,8 | +3346,0 | +127 |
| Загалом | 159350,9 | 100,0 | 158173 | 100 | -1177,9 | -0,74 |

За січень–травень 2019 року, за фактичними даними Мінпаливенерго, обсяг виробництва електричної енергії електростанціями України, які входять до ОЕС України, у цілому склав 68078,5 млн. кВт·год, що на 124,7 млн. кВт·год, або на 0,2% менше, ніж за 5 місяців 2018 року. При цьому, ТЕС ГК вироблено 19047,1 млн. кВт·год, що на 1216,5 млн. кВт·год, або на 6,0% менше, ніж за 5 місяців 2018 р. ТЕЦ та КУ вироблено 5805,2 млн. кВт·год, що на 21,6 млн. кВт·год, або на 0,4% менше, ніж за відповідний період 2018 року. АЕС вироблено 36915,4 млн. кВт·год, що у порівнянні з відповідним періодом минулого року більше на 3479,2 млн. кВт·год, або на 10,4%. ГЕС та ГАЕС за 5 місяців 2019 року вироблено 3868,0 млн. кВт·год, що на 3200,5 млн. кВт·год, або на 45,3% менше, ніж за 5 місяців 2018 р.

Виробіток ТЕС та ТЕЦ за 5 місяців 2019 року від загального по ОЕС склав 36,5%, виробіток електроенергії АЕС склав 54,2%, а виробіток ГЕС та ГАЕС – 5,7%. За 5 місяців 2018 р. частка виробітку ТЕС та ТЕЦ, АЕС, ГЕС та ГАЕС складала відповідно 38,3%, 49,0% і 10,4%.

Виробництво електроенергії блок-станціями за 5 місяців 2019 року склало 656,2 млн. кВт·год, що на 67,8 млн. кВт·год, або на 11,5% більше, ніж за відповідний період 2018 року.

Виробництво електроенергії альтернативними джерелами (ВЕС, СЕС, біомаса) за 5 місяців 2019 року склало 1786,6 млн. кВт·год (2,62 відсотки від загального виробництва електроенергії), що на 766,9 млн. кВт, або на 75,2% більше, ніж за відповідний період 2018 року. Причому за II кв. 2019 р. Частка ВДЕ у виробництві електроенергії сягнула 3,3 %, при тому. Що частка ВДЕ в вартості електричної енергії становить 13,6 %.

Однак можлива поява нових викликів для національної енергосистеми у вигляді інтенсивного розвитку ВДЕ [3, 6, 8, 42]. Існує низка факторів, які безпосередньо впливають на роботу енергосистеми, зокрема, слабка прогнозованість і велика нерівномірність навантаження СЕС і ВЕС [8, 12]. Відхилення

навантаження й перевищення вироблення ВЕС і СЕС порівняно з рівнем споживання енергії в деяких випадках не можуть бути скомпенсовані регулюючою здатністю інших енергетичних об'єктів ОЕС України.

НЕК «Укренерго» прораховано, що при наявній потужності ВЕС в 463 МВт та СЕС в 754 МВт нормативний обсяг резервів в ОЕС України має бути 650 МВт. При цьому планові коливання виробництва потужності ВДЕ в обсязі до 450 МВт мають враховуватися при формуванні добового графіку. Система збалансована; ВДЕ заміщують виробництво електроенергії ТЕС в обсязі до 2 млрд. кВт·год на рік.

За даними НЕК «Укренерго», рівні генерації ВЕС – 1500 МВт та СЕС – 1500 МВт – це максимальний рівень потужності СЕС та ВЕС, яку може прийняти ОЕС України без серйозних відхилень в роботі [6, 8, 43]. При цьому система залишається збалансованою, ВДЕ заміщують виробництво електроенергії ТЕС в обсязі 6 млрд. кВт·год в рік. Відповідна встановлена потужність ВДЕ може бути досягнута у грудні 2019 р. Однак до грудня 2019 р. структура генерації має бути змінена задля забезпечення зростання частки ВДЕ в енергобалансі. За результатами спільного дослідження, проведеного НЕК «Укренерго» разом з USAID та міжнародних експертів Tetra TechES і Mercados (презентовано у грудні 2018 р.), передбачалося, що до кінця 2020 р. ОЕС України зможе прийняти не більш як 4750 МВт ВДЕ: (ВЕС – 1750 МВт, СЕС – 3000 МВт). Якщо енергосистемі потрібним є резерв у 1000 МВт, його насамперед забезпечать десятки енергоблоків ТЕС. Такий сценарій розвитку може бути умовно названо «зелено-вугільним парадоксом», коли різке зростання ВДЕ призводить не до декарбонізації, а до збільшення виробленої електроенергії та вугільної генерації з усіма відповідними наслідками. Частка ТЕС не в процентному, а у фінансовому вираженні зростатиме (вони надаватимуть додаткові послуги, працюючи на найдорожчому балансуєчому ринку, тому їхній прибуток ростиме).

Отже, на сьогодні національна енергосистема збалансована, хоча відхилення у добовому виробництві електроенергії ВДЕ досягають вже 450 МВт, а 3000 МВт – той рівень потужності ВДЕ, який зможе прийняти енергосистема без суттєвих змін у структурі ОЕС, що буде досягнуто у грудні 2019 року. Збільшення встановленої потужності ВДЕ до 7426 МВт, згідно виданих технічних умов на приєднання, призведе до зменшення бази АЕС на 5750 МВт та збільшення бази ТЕС на 2800 МВт. Це суперечить курсу на декарбонізацію української енергетики. Єдиний шлях – вводити електростанції швидкодіючого мобільного резерву (газопоршневі станції, ГАЕС) потужністю до 3000 МВт, що збільшить базове навантаження АЕС до 6500 МВт при роботі ТЕС на рівні 1500 МВт (при цьому частина ТЕС буде зупинена).

За умови обмеження атомної генерації, відсутності обмежень для ВДЕ та значного збільшення базової генерації ГК ТЕС збільшать вартість електроенергії на 630,25 грн. за 1 МВт·год від поточної ціни (зростання на 57,7 %). За умови відсутності обмежень для ВДЕ, зменшення базової генерації ГК ТЕС та введення нових маневрових потужностей на 2500 МВт збільшить вартість електроенергії на 532 грн. за 1 МВт·год поточної ціни (зростання на 48,7 %). За умови обмеження ВДЕ вартість електроенергії зросте на 1084,31 грн. за 1 МВт·год (або на 99,2 %) від поточної ціни.

На кінець II кв. 2019 р. видано технічні умови і підписано договори на приєднання понад 6330 МВт нових СЕС і близько 4250 МВт ВЕС за старим високим тарифом для об'єктів генерації, які заявлені й тільки починають будуватися. За даними НЕК «Укренерго», якщо всі ці об'єкти буде побудовано, то в енергосистемі потужність ВЕС і СЕС становитиме близько 13500 МВт, а ціна на електричну енергію зросте мінімум удвічі. І це тільки за рахунок «зелених» генерації.

За розрахунками НЕК «Укренерго», до 2025 р. ОЕС може розвиватися за трьома сценаріями. Однак у будь-якому випадку необхідні додаткові заходи для балансування системи [3, 6, 8, 42]:

«А» – не вводяться додаткові високоманеврові потужності (за наявного рівня прогнозування) і вимушено обмежується виробництво електроенергії з ВДЕ;

«В» – обмежується частка АЕС та, відповідно, збільшується частка вугільної генерації для забезпечення необхідних маневрових потужностей і при цьому не обмежується розвиток «зеленої» генерації;

«С» – забезпечується розвиток та збільшується обсяг «зеленої» генерації при впровадженні системи точного прогнозування та будівництві 2,5 тис. МВт нових високоманеврових балансуєчих потужностей.

НЕК «Укренерго» підтримує третій, найоптимальніший з точки зору збалансованості інтересів споживача і розвитку ВДЕ, варіант [6, 8, 43]. Першою складовою плану «С» розвитку «зеленої» генерації є введення 2,5 тис. МВт нових високоманеврових балансуєчих потужностей, що дозволить уникнути зростання генерації електроенергії на ТЕС і обмеження генерації з ВДЕ та АЕС, а також стримати зростання тарифів на електроенергію для споживачів усіх категорій. Орієнтовна вартість будівництва таких високоманеврових потужностей – 55 млрд. грн., термін окупності – близько шести років. Це дозволить зекономити споживачам близько 65 млрд. грн. щорічно за рахунок мінімізації зростання тарифу на електроенергію, який також залежить від складу генерації.

Найоптимальнішим є будівництво газопоршневих електростанцій з 10-хвилинним періодом виходу

блоків на повну потужність та систем акумуляції енергії, що дозволяють швидко регулювати відхилення на інтервалі часу менше 1 год. Також першочерговим заходом реалізації плану «С» є впровадження системи точного прогнозування з відхиленням: на ринку на добу наперед з похибкою 5–10 %, внутрішньодобове планування з похибкою 3–5 %. Для забезпечення надійної роботи ОЕС України необхідним є введення нових потужностей: 2000 МВт газопоршневих електростанцій та 500 МВт – акумулятори.

У табл. 9 наведено запропоновані НЕК «Укренерго» резерви потужності в ОЕС України для регулювання ВЕС та СЕС за рахунок нових маневрених потужностей та акумуляторних батарей (в МВт).

Щодо малої «зеленої» енергетики, то можемо зазначити, що мала «зелена» енергетика не має таких проблем, як велика, оскільки дахові приватні СЕС для приєднання не потребують технічних умов. Законодавчо обмежено потужності таких приватних СЕС до рівня 50 кВт і дозволено їх встановлювати на дахах і фасадах при умові внутрішнього споживання [8, 42].

Відповідно до Закону України щодо нової системи підтримки «зеленої» енергетики від 25.04.2019 № 2712-VIII (<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2712-19>) із 2020 року нові потужності відновлюваної електроенергетики прийматимуть участь в аукціонах, що дозволить суттєво зменшити ціну на закупівлю електроенергії із ВДЕ. Наведемо порівняння «зелених» тарифів, що діятимуть у III кв. 2019 р., із тарифами на електричну енергію, коп./кВт·год з ПДВ [43]: населення (до 100 кВт) – 90,0; населення (понад 100 кВт) – 168,0; середні тарифи I кл. напруги – 173,67; середні тарифи II кл. напруги – 216,87; мінімальний «зелений» тариф – 213,78; середній «зелений» тариф на III кв. – 591,93; максимальний «зелений» тариф – 1710,28. Як видно з наведених даних, максимальний «зелений» тариф більше ніж у 10 разів тариф на електроенергію для населення.

Таблиця 9

| Тип потужності | Рік | | | | | | | |
|-------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | 2024 | 2025 |
| Маневрений резерв ТЕС і ГЕС | 1900 | 1800 | 1600 | 1400 | 1200 | 1100 | 1100 | 1100 |
| Швидкодіючий резерв ТЕС і ГЕС | 600 | 600 | 700 | 700 | 600 | 600 | 500 | 500 |
| Нові маневрені потужності | – | – | 500 | 800 | 1200 | 1500 | 1800 | 2000 |
| Акумуляторні батареї | – | – | – | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 |

Висновки:

1. У другому десятилітті ХХ ст. в енергетичному секторі спостерігається значний прогрес, але темпи цього прогресу необхідно прискорити. ВДЕ та енергоефективність разом утворюють наріжний камінь для світового вирішення проблеми викидів CO₂, пов'язаних з енергетикою. Вони можуть забезпечити більше 90 % скорочень викидів CO₂ в енергетиці, необхідних для затримання зростання глобальної температури 2 °С. Щоб декарбонізувати глобальну енергетику досить швидко і уникнути гірших наслідків зміни клімату, ВДЕ повинні становити не менше двох третин загальної поставки енергії до 2050 року.

2. Важливого значення для реалізації запропонованого міжнародними організаціями глобального енергетичного переходу набуває реалізація політики комплексного підвищення енергоефективності та впровадження енергозберігаючих заходів, зокрема, щорічне зниження енергоємності виробництва товарів та надання послуг у світовому масштабі має зрости у 2–3 рази (для України це зростання має бути не менше ніж у 4–5 разів).

3. Міжнародні енергетичні агентства (IEA, IRENA, OECD) рекомендують зосередити увагу національних політик на довгострокових стратегіях, спрямованих на досягнення нульового викиду вуглецю. Ними підкреслюється необхідність стимулювання і використання системних інновацій. Зокрема, це включає в себе створення більш інтелектуальних енергетичних систем за допомогою дигіталізації, а також взаємодію секторів кінцевого споживання енергії, зокрема, опалення, охолодження та транспорту, за рахунок підвищення рівня електрифікації та децентралізації.

4. Якщо європейська енергосистема порівняно з українською дуже гнучка й здатна витримати пікові навантаження за рахунок багатьох факторів, то можливості ж нашої енергосистеми у цій частині обмежені регулювальною здатністю маневрених потужностей – ТЕС, ГЕС і ГАЕС.

5. В Україні переходу до низьковуглецевої енергетики перешкоджають застаріла інфраструктура, часто із завищеною потужністю, побудована в радянський період, енергетичні субсидії, перехресне субсидування та відсутність тарифів за викиди вуглецю. Енергетичні субсидії та перехресне субсидування підривають перехід до низьковуглецевої економіки різними способами, наприклад, сприяючи

марнотратному споживанню електроенергії, перешкоджаючи інвестиціям приватного сектора в енергоефективність та екологічно чисту енергію та створюючи у енергомістких секторах економіки лобі, яке зацікавлене в збереженні існуючого стану.

6. Україні потрібно здійснити перехід від монопольних до конкурентних енергоринків, оновити стратегії розвитку секторів і відповідні індикативні цілі в національних планах дій, а також впровадити ринкові інструменти підтримки для "зеленої" енергетики та енергоефективності.

Список використаної літератури

1. Денисюк С.П., Таргонський В.А. Сталий розвиток енергетики України у світових вимірах // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2017. – № 3. – С.7 – 31.

2. Європейський Союз. Що це таке і що він робить. – Київ: Представництво ЄС в Україні, 2018. – 60 с. [Електронний ресурс] URL: www.eeas.europa.eu/delegations/ukraine

3. Залучення сонячних та вітрових електростанцій до покриття навантаження ОЕС України. – НЕК «Укренерго», 2019 [Електронний ресурс] URL: <https://ua.energy/wp-content/uploads/2018/04/Zaluchennya-VDE.pdf>

4. Матюшок В.М., Серджио Бруно, Балашова С.А., Гомонов К.Г. Влияние smart grid и возобновляемых источников энергии на энергоэффективность: зарубежный опыт // Вестник РУДН. Серия: Экономика. – 2017. Т. 25. – № 4. – С. 583–598.

5. Основні положення енергетичних стратегій та програм Європейського Союзу щодо розвитку енергетичної сфери в умовах формування загальноєвропейського ринку електроенергії [Електронний ресурс] URL: <https://ua.energy/wp-content/uploads/2017/05/2.-Energetychni-Strategiyi-YES.pdf>

6. План розвитку системи передачі на 2020-2029 роки. – НЕК «Укренерго», 2019. – 208 с. [Електронний ресурс] URL: <https://ua.energy/wp-content/uploads/2019/03/Plan-rozvytku-systemy-peredachi-20-29.pdf>

7. Преобразование глобальной энергетической системы. Дорожная карта до 2050. Краткий обзор. – IRENA, 2019. – 12 с. [Електронний ресурс] URL: https://irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Apr/IRENA_Global_Energy_Transformation_2018_summary_RU.pdf?la=en&hash=65D7B55F58A18EFA01D7F0FB0A74DA691F9C57F9

8. Проблемні питання розвитку виробництва електроенергії з ВДЕ в ОЕС України. [Електронний ресурс] URL: <https://ua.energy/wp-content/uploads/2018/03/13.03.18-Kovalchuk-VRU-zelena-generatsiya.pdf>

9. Продвигая глобальный переход к возобновляемой энергетике. Основные результаты доклада REN21 о Глобальном состоянии возобновляемой энергетики. – Секретариат REN21, Париж, Франция 2018. – 52 с. [Електронний ресурс] URL: http://www.ren21.net/wpcontent/uploads/2018/09/GSR_2018_Highlights_Russian_FINAL-11.pdf; GSR 2018

10. Публічний звіт Голови Держенергоефективності. Розвиток сфери енергоефективності та «зеленої» енергетики в Україні: підсумки 2018 р. і плани на 2019 рік. – 07.02.2019 [Електронний ресурс] URL: http://sae.gov.ua/sites/default/files/2018_19_report_07_02_2019.pdf

11. Результаты конференции «Берлинский диалог в области энергетического перехода 2017» (20 – 21 марта, Берлин) [Електронний ресурс] URL: <https://energy.hse.ru/data/2017/10/04/1159484168/%D0%91%D0%B5%D1%80%D0%BB%D0%B8%D0%BD%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B9%20%D0%B4%D0%B8%D0%B0%D0%BB%D0%BE%D0%B3.pdf>

12. Роль і місце української енергетики у світових енергетичних процесах. – К.: Центр Разумкова, 2018. – 90 с. [Електронний ресурс] URL: http://razumkov.org.ua/uploads/article/2018_ENERGY_PRINT.pdf

13. Україна встановила об'єкти альтернативної енергії на 656 мегават. [Електронний ресурс] URL: https://socportal.info/2019/06/28/ukrajina_vstanovila_objektiv_alternativnoji_energiji_na_656_megavat.html

14. У Німеччині новий рекорд виробництва струму з відновлюваних джерел [Електронний ресурс] URL: <https://www.dw.com/uk/-49651097>

15. Clean Energy For All Europeans. – 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. – Brussels, 30.11.2016 COM(2016) 860 final [Електронний ресурс] URL: https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:fa6ea15b-b7b0-11e6-9e3c-01aa75ed71a1.0001.02/DOC_1&format=PDF

16. Clean Energy Investment Trends, 2018. – January 16, 2019 [Електронний ресурс] URL: <https://data.bloomberglp.com/professional/sites/24/BNEF-Clean-Energy-Investment-Trends-2018.pdf>

17. Energy Subsidy Reform in the Republic of Moldova: Energy Affordability, Fiscal and Environmental Impacts, Green Finance and Investment, OECD Publishing, Paris, 2018. [Електронний ресурс] URL: <http://www.oecd.org/publications/energy-subsidy-reform-schemes-in-the-republic-of-moldova-9789264292833-en.htm>

18. Fourth “Energy Transition” Monitoring Report – Summary. The Energy of the Future. – The Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (BMWi) Berlin, 2015. – 28 p. [Електронний ресурс] URL: https://www.bmwi.de/Redaktion/EN/Publikationen/vierter-monitoring-bericht-energie-der-zukunft-kurzfassung.pdf?__blob=publicationFile&v=16
19. Global Trends in Clean Energy and Transportation. Smart Energy Day, 31 August 2018 Fondation The Arc, Sion. – Michael Liebreich Founder and CEO Liebreich Associates [Електронний ресурс] URL: <https://www.eventsmartenergy.ch/wp-content/uploads/2018/09/9-Michael-Liebreich.pdf>
20. Global Trends in Renewable Energy Investment 2018, <http://www.fs-unesp-centre.org> (Frankfurt am Main) – 86 p. [Електронний ресурс] URL: <https://www.coursehero.com/file/35496181/17278nef-visual-5a-1-1pdf/>
21. GSR 2018 Highlights Russian. 20 – REN21 [Електронний ресурс] URL: http://www.ren21.net/wpcontent/uploads/2018/09/GSR_2018_Highlights_Russian_FINAL-11.pdf
22. Hauff J., Bode A., Neumann D., Haslauer F. Global Energy Transitions. World Energy Council. 2014. 32 p. [Електронний ресурс] URL: https://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2014/12/Global-Energy-Transitions-2014_EfG2014-mit-AT-Kearney.pdf
23. Inventory of Energy Subsidies in the EU's Eastern Partnership Countries, Green Finance and Investment, OECD Publishing, Paris, 2018. [Електронний ресурс] URL: <https://doi.org/10.1787/9789264284319-en>
24. IRENA (2018), Global Energy Transformation: A roadmap to 2050, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. [Електронний ресурс] URL: <https://irena.org/publications/2018/Apr/Global-Energy-Transition-A-Roadmap-to-2050>
25. IRENA (2019), Global energy transformation: A roadmap to 2050 (2019 edition), International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. [Електронний ресурс] URL: <https://irena.org/publications/2019/Apr/Global-energy-transformation-A-roadmap-to-2050-2019Edition>
26. Key Facts about the Energy Transition in Germany. – Berlin Energy Transition Dialogue 2019. Berlin, Germany. – Energiewende – New Horizons. 12 p. [Електронний ресурс] URL: https://2019.energydialogue.berlin/wp-content/uploads/2019/02/BETD-2019_Flyer_WEB.pdf
27. Krause F., Bossel H., Müller-Reißmann K.F. Energie - Wende. Wachstum und Wohlstand ohne Erdöl und Uran. – S. Fischer Verlag, 1980, ASIN: B0029KUZBI. [Електронний ресурс] URL: <http://www2.hu-berlin.de/sachbuchforschung/CONTENT/SBDB/pix/PDF/Krause-Energie-Inhalt.pdf>
28. Long-Term Energy Scenarios for the clean energy transition. First-year campaign findings May 2019. – The International Renewable Energy Agency (IRENA). – 12 p. [Електронний ресурс] URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/May/IRENA_LTES_findings_2019.pdf
29. Perspectives for the Energy Transition. – OECD/IEA and IRENA (2017) [Електронний ресурс] URL: <https://www.iea.org/publications/insights/insightpublications/PerspectivesfortheEnergyTransition.pdf>
30. Ram M., Bogdanov D., Aghahosseini A., Gulagi A., Oyewo A.S., Child M., Caldera U., Sadovskaia K., Farfan J., Barbosa LSNS., Fasihi M., Khalili S., Dalheimer B., Gruber G., Traber T., De Caluwe F., Fell H.-J., Breyer C. Global Energy System based on 100% Renewable Energy – Power, Heat, Transport and Desalination Sectors. Study by Lappeenranta University of Technology and Energy Watch Group, Lappeenranta, Berlin, March 2019. – 321 p. [Електронний ресурс] URL: http://energywatchgroup.org/wp-content/uploads/EWG_LUT_100RE_All_Sectors_Global_Report_2019.pdf
31. Renewable capacity highlights 31 March 2019. [Електронний ресурс] URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Mar/RE_capacity_highlights_2019.pdf?la=en&hash=BA9D38354390B001DC0CC9BE03EEE559C280013F
32. Renewable capacity statistics 2019, International Renewable Energy Agency (IRENA), Abu Dhabi, 2019. – 60 p. [Електронний ресурс] URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Mar/IRENA_RE_Capacity_Statistics_2019.pdf
33. Renewable energy in Europe — 2018. Recent growth and knock-on effects. – European Environment Agency Kongens Nytorv 6 1050 Copenhagen K Denmark. - EEA Report No 20/2018. – 80 p. [Електронний ресурс] URL: <https://www.eea.europa.eu/publications/renewable-energy-in-europe-2018>
34. Renewable Energy Status Report 2017. – REN21 & UNECE (2017) [Електронний ресурс] URL: https://www.unece.org/fileadmin/DAM/energy/se/pp/renew/Renewable_energy_report_2017_web.pdf
35. Renewable Energy Trends Green Power 2018, Chennai Vandana Gombar, December 5, 2018, BloombergNEF [Електронний ресурс] URL: <http://www.greenpower-cii.com/gdoc18/Renewable%20Energy%20Trends%20-%20Vandana%20Gombar.pdf>
36. Renewables 2018 Global Status Report. – REN21 [Електронний ресурс] URL: <http://www.ren21.net/gsr-2018/>

37. The European Power Sector in 2018 – Agora [Електронний ресурс] URL: https://www.agora-energiewende.de/fileadmin2/Projekte/2018/EU-Jahresauswertung_2019/Agora-Energiewende_European-Power-Sector-2018_WEB.pdf
38. World Energy Outlook 2018. – IEA [Електронний ресурс] URL: <https://www.iea.org/weo2018/>
39. Opportunities generated. - BloombergNEF [Електронний ресурс] URL: <https://about.bnef.com/>
40. EU 2020 target for energy efficiency 2019. - European Commission [Електронний ресурс] URL: <https://ec.europa.eu/>
41. Energy consumption 2019. - Eurostat [Електронний ресурс] URL: <https://ec.europa.eu/eurostat>
42. Дані щодо доступності та фактичного використання генеруючих потужностей та електроустановок споживання, здатних до регулювання 2019. - УКРЕНЕРГО [Електронний ресурс] URL: <https://ua.energy/>
43. Розвиток сектору ВДЕ за I квартал 2019 року - Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг [Електронний ресурс] URL: <http://www.nerc.gov.ua/>

S. Denysiuk, Dr. Eng. Sc., Prof. ORCID 0000-0002-6299-3680
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

ENERGY TRANSITION - REQUIREMENTS FOR QUALITY CHANGES IN ENERGY SECTOR DEVELOPMENT

The article presents the formation of the energy transition basics. It is shown that in order to implement the current provisions of the energy transition, a systematic approach is needed; the basic elements of such transition are integration of renewable energy and energy efficiency (intensification of energy intensity reduction of goods and services).

The main factors and forces of the global energy transition, formed by the International Renewable Energy Agency (IRENA) in cooperation with other international agencies in the late 20's of the 21st century, are presented. The article analyzes the development of legislative and regulatory regulation of European Union electricity markets activity, which created the system background for implementing the provisions of the European energy transition.

The characteristic features of the acceleration of renewable energy sources implementation, in particular solar, worldwide and in Ukraine 2017-2018 are considered, the provisions of the Fourth Energy Package (Winter energy package) and the construction of the Energy Union.

Features of the Ukrainian energy transition in the field of implementation of renewable energy sources are described.

Key words: energy transition, power system, renewable energy, energy efficiency, solar power, wind power

References

1. Denysiuk S., V. Tarhonskyi V. Sustainable development of Ukraine's energy in the world measures // Power engineering: economics, technique, ecology. – 2017. – №8. – p. 7–31.
2. The European Union. What it is and what it does. – Kyiv: EU Delegation to Ukraine, 2018. – 60 p. [Electronic resource] URL: www.eeas.europa.eu/delegations/ukraine
3. Involvement of solar and wind power plants to cover the load of the UES of Ukraine. - Ukrenergo NPP, 2019 [Electronic resource] URL: <https://ua.energy/wp-content/uploads/2018/04/Zaluchennya-VDE.pdf>
4. VM Matyushok, Sergio Bruno, SA Balashova, KG Gomonov Influence of smart grid and renewable energy sources on energy efficiency: foreign experience // Vestnik RUDN. Series: Economics. – 2017. T. 25. – № 4. – P. 583–598.
5. Basic provisions of the European Union's energy strategies and programs for the development of the energy sector in the context of the formation of a pan-European electricity market [Electronic resource] URL: <https://ua.energy/wp-content/uploads/2017/05/2.-Energetychni-Strategiyi-YES.pdf>
6. Plan of development of the transmission system for 2020–2029. – Ukrenergo NPP, 2019. – 208 p. [Electronic resource] URL: <https://ua.energy/wp-content/uploads/2019/03/Plan-rozvytku-systemy-peredachi-20-29.pdf>
7. Transformation of the global energy system. Roadmap to 2050. Summary. – IRENA, 2019. – 12 p. [Electronic resource] URL: https://irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Apr/IRENA_Global_Energy_Transformation_2018_summary_RU.pdf?la=en&hash=65D7B55F58A18EFA01D7F0FB0A74DA691F9C57F9
8. Problematic issues of development of electricity production from RES in the Ukrainian UES. [Electronic resource] URL: <https://ua.energy/wp-content/uploads/2018/03/13.03.18-Kovalchuk-VRU-zelena-generatsiya.pdf>

9. Promoting a global transition to renewable energy. Main results of the REN21 report on the Global Renewable Energy Situation. – REN21 Secretariat, Paris, France 2018 – 52 p. [Electronic resource] URL: http://www.ren21.net/wpcontent/uploads/2018/09/GSR_2018_Highlights_Russian_FINAL-11.pdf; GSR 2018
10. Public report of the Head of the State Energy Efficiency. Development of the Energy Efficiency and Green Energy Sector in Ukraine: Results of 2018 and Plans for 2019. – 07.02.2019 [Electronic resource] URL: http://sae.gov.ua/sites/default/files/2018_19_report_07_02_2019.pdf
11. Results of the Berlin Energy Dialogue 2017 Conference (March 20 – 21, Berlin). [Electronic resource] URL: <https://energy.hse.ru/data/2017/10/04/1159484168/%D0%91%D0%B5%D1%80%D0%BB%D0%B8%D0%BD%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B9%20%D0%B4%D0%B8%D0%B0%D0%BB%D0%BE%D0%B3.pdf>
12. The role and place of Ukrainian energy in the world energy processes - Razumkov Center, Kyiv: 2018. – 90 p. [Electronic resource] URL: http://razumkov.org.ua/uploads/article/2018_ENERGY_PRINT.pdf
13. Ukraine has installed alternative energy facilities at 656 megawatts. [Electronic resource] URL: https://socportal.info/2019/06/28/ukrajina_vstanovila_objektiv_alternativnoji_energiji_na_656_megavat.html
14. A new record for the production of electricity from renewable sources in Germany [Electronic resource] URL: <https://www.dw.com/uk/-49651097>
15. Clean Energy For All Europeans. – 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. – Brussels, 30.11.2016 COM(2016) 860 final [Electronic resource] URL: https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:fa6ea15b-b7b0-11e6-9e3c-01aa75ed71a1.0001.02/DOC_1&format=PDF
16. Clean Energy Investment Trends, 2018. – January 16, 2019 [Electronic resource] URL: <https://data.bloomberglp.com/professional/sites/24/BNEF-Clean-Energy-Investment-Trends-2018.pdf>
17. Energy Subsidy Reform in the Republic of Moldova: Energy Affordability, Fiscal and Environmental Impacts, Green Finance and Investment, OECD Publishing, Paris, 2018. [Electronic resource] URL: <http://www.oecd.org/publications/energy-subsidy-reform-schemes-in-the-republic-of-moldova-9789264292833-en.htm>
18. Fourth “Energy Transition” Monitoring Report – Summary. The Energy of the Future. – The Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (BMWi) Berlin, 2015. – 28 p. [Electronic resource] URL: https://www.bmwi.de/Redaktion/EN/Publikationen/vierter-monitoring-bericht-energie-der-zukunft-kurzfassung.pdf?__blob=publicationFile&v=16
19. Global Trends in Clean Energy and Transportation. Smart Energy Day, 31 August 2018 Fondation The Arc, Sion. – Michael Liebreich Founder and CEO Liebreich Associates [Electronic resource] URL: <https://www.eventsmartenergy.ch/wp-content/uploads/2018/09/9-Michael-Liebreich.pdf>
20. Global Trends in Renewable Energy Investment 2018, <http://www.fs-unep-centre.org> (Frankfurt am Main) – 86 p. [Electronic resource] URL: <https://www.coursehero.com/file/35496181/17278nef-visual-5a-1-1pdf/>
21. GSR 2018 Highlights Russian. 20 – REN21 [Electronic resource] URL: http://www.ren21.net/wpcontent/uploads/2018/09/GSR_2018_Highlights_Russian_FINAL-11.pdf
22. Hauff J., Bode A., Neumann D., Haslauer F. Global Energy Transitions. World Energy Council. 2014. 32 p. [Electronic resource] URL: https://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2014/12/Global-Energy-Transitions-2014_EfG2014-mit-AT-Kearney.pdf
23. Inventory of Energy Subsidies in the EU's Eastern Partnership Countries, Green Finance and Investment, OECD Publishing, Paris, 2018. [Electronic resource] URL: <https://doi.org/10.1787/9789264284319en>
24. IRENA (2018), Global Energy Transformation: A roadmap to 2050, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. [Electronic resource] URL: <https://irena.org/publications/2018/Apr/Global-Energy-Transition-A-Roadmap-to-2050>
25. IRENA (2019), Global energy transformation: A roadmap to 2050 (2019 edition), International Renewable Energy Agency, Abu Dhab. [Electronic resource] URL: <https://irena.org/publications/2019/Apr/Global-energy-transformation-A-roadmap-to-2050-2019Edition>
26. Key Facts about the Energy Transition in Germany. – Berlin Energy Transition Dialogue 2019. Berlin, Germany. – Energiewende – New Horizons. 12 p. [Electronic resource] URL: https://2019.energydialogue.berlin/wp-content/uploads/2019/02/BETD-2019_Flyer_WEB.pdf
27. Krause F., Bossel H., Müller-Reißmann K.F. Energie - Wende. Wachstum und Wohlstand ohne Erdöl und Uran. – S. Fischer Verlag, 1980, ASIN: B0029KUZBI. [Electronic resource] URL: <http://www2.hu-berlin.de/sachbuchforschung/CONTENT/SBDB/pix/PDF/Krause-Energie-Inhalt.pdf>
28. Long-Term Energy Scenarios for the clean energy transition. First-year campaign findings May 2019. – The International Renewable Energy Agency (IRENA). – 12 p. [Electronic resource] URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/May/IRENA_LTES_findings_2019.pdf

29. Perspectives for the Energy Transition, – OECD/IEA and IRENA (2017) [Electronic resource] URL: <https://www.iea.org/publications/insights/insightpublications/PerspectivesfortheEnergyTransition.pdf>
30. Ram M., Bogdanov D., Aghahosseini A., Gulagi A., Oyewo A.S., Child M., Caldera U., Sadovskaia K., Farfan J., Barbosa LSNS., Fasihi M., Khalili S., Dalheimer B., Gruber G., Traber T., De Caluwe F., Fell H.-J., Breyer C. Global Energy System based on 100% Renewable Energy – Power, Heat, Transport and Desalination Sectors. Study by Lappeenranta University of Technology and Energy Watch Group, Lappeenranta, Berlin, March 2019. – 321 p. [Electronic resource] URL: http://energywatchgroup.org/wp-content/uploads/EWG_LUT_100RE_All_Sectors_Global_Report_2019.pdf
31. Renewable capacity highlights 31 March 2019. [Electronic resource] URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Mar/RE_capacity_highlights_2019.pdf?la=en&hash=BA9D38354390B001DC0CC9BE03EEE559C280013F
32. Renewable capacity statistics 2019, International Renewable Energy Agency (IRENA), Abu Dhabi, 2019. – 60 p. [Electronic resource] URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Mar/IRENA_RE_Capacity_Statistics_2019.pdf
33. Renewable energy in Europe — 2018. Recent growth and knock-on effects. – European Environment Agency Kongens Nytorv 6 1050 Copenhagen K Denmark. - EEA Report No 20/2018. – 80 p. [Electronic resource] URL: <https://www.eea.europa.eu/publications/renewable-energy-in-europe-2018>
34. Renewable Energy Status Report 2017. – REN21 & UNECE (2017) [Electronic resource] URL: https://www.unece.org/fileadmin/DAM/energy/se/pp/renew/Renewable_energy_report_2017_web.pdf
35. Renewable Energy Trends Green Power 2018, Chennai Vandana Gombar, December 5, 2018, BloombergNEF [Electronic resource] URL: <http://www.greenpower-cii.com/gdoc18/Renewable%20Energy%20Trends%20-%20Vandana%20Gombar.pdf>
36. Renewables 2018 Global Status Report. – REN21 [Electronic resource] URL: <http://www.ren21.net/gsr-2018/>
37. The European Power Sector in 2018 – Agora [Electronic resource] URL: https://www.agora-energiewende.de/fileadmin2/Projekte/2018/EU-Jahresauswertung_2019/Agora-Energiewende_European-Power-Sector-2018_WEB.pdf
38. World Energy Outlook 2018 [Electronic resource] URL: <https://www.iea.org/weo2018/>
39. Opportunities generated. - BloombergNEF [Electronic resource] URL: <https://about.bnef.com/>
40. EU 2020 target for energy efficiency 2019. - European Commission [Electronic resource] URL: <https://ec.europa.eu/>
41. Energy consumption 2019. - Eurostat [Electronic resource] URL: <https://ec.europa.eu/eurostat>
42. Data on availability and actual use of power generating capacity and electrical installations capable of regulation 2019. – UKRENERGO [Electronic resource] URL: <https://ua.energy/>
43. Development of RES sector 2019. - ENERGY AND UTILITIES the NATIONAL REGULATORY COMMISSION, UKRAINE [Electronic resource] URL: <http://www.nerc.gov.ua/>

Надійшла 21.03.2019
Received 21.03.2019

SMART GRID СИСТЕМИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ SMART GRID SYSTEM AND TECHNOLOGY

UDC 621.311.1 : 620.92

Y. Veremiichuk, Cand. Sc. (Eng.), ORCID 0000-0003-0258-0478

I. Prytyskach, Cand. Sc. (Eng.), ORCID 0000-0002-1892-0054

O. Yarmoliuk, Cand. Sc. (Eng.), ORCID 0000-0001-8571-2573

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

THE FUNCTIONING MODEL OF INTEGRATED ENERGY SUPPLY SYSTEM WITH CO-GENERATION UNITS OPERATION, TAKING INTO ACCOUNT PROSPECTS OF BIOENERGY DEVELOPMENT IN UKRAINE

In conditions of renewable energy sources development and implementation of modern technologies in the energy sector, energy from biomass in the structure of power supply systems is an actual topic. The development of bioenergy is an important part of ensuring the energy security of many countries, as it enables to reduce fossil fuel consumption, dependence on imported energy sources and ensure sustainable local energy supply. The article presents the functioning model of integrated energy supply system (energy hub) with co-generation units operation, taking into account prospects of bioenergy development in Ukraine. This paper studies the optimal operation problem of an energy hub with multiple energy sources to serve electricity and heat loads in the presence prices. The main task was solved to make full use of its own energy sources to meet the needs of consumers in energy carriers with the most effective financial performance. The availability of electric and thermal energy storage devices will allow more efficient usage of available energy resources and equipment. Usage of a cogeneration plant in the structure of the energy hub gives the opportunity to provide energy resources and the possibility of generated electricity trading. A multicriteria approach to the planning and optimization of the operation of such energy hub is proposed. According to the simulation results using the example of an energy hub, it is shown that this method is suitable for planning hourly energy consumption with a compromise in terms of the minimum cost of these energy resources and CO₂ emissions.

Keywords: integrated power distribution systems, distributed generation, active consumer, cogeneration technology, energy hub, CHP based microgrid, biomass, biogas.

1. Introduction

Current energy policy of developed countries is based on understanding an exhaustion of traditional fuel and energy resources, the need to preserve the environment and prevent global climate change. That is why in the world so much attention is devoted to issues of energy saving, energy efficiency and the use of renewable energy sources (RES). Ukraine does not stand aside too; renewable energy development issue is a priority today.

The development of unconventional and renewable energy sources should be considered as an important factor in improving energy security. The large-scale use of the potential of such energy sources in Ukraine is not only a national priority, but also has significant international significance as an important factor in countering global climate change, and improves the overall state of energy security in Europe. That is why increasing the level of use of alternative (non-conventional and renewable) energy and fuel sources is one of the main areas of implementation of the state policy of energy saving in Ukraine.

According to the Energy Balance of Ukraine from 2014 to 2017, the share of energy produced from renewable energy sources in gross final energy consumption, calculated according to the rules of Directive 2009 /28 /EU, increased from 3.9 % to 6,7 %.

A significant increase in the share of «clean» energy in final energy consumption is noted in specific sectors:

- power industry – from 7.4 % to 8.6 %;
- heating, cooling systems – from 3.4 % to 7.6%;

Noteworthy is the fact that bioenergy is actively developing in Ukraine. In 2017, biofuels and wastes occupy the largest share in the energy recovery from renewable sources, 80 %. Thus, according to the Bioenergy Association of Ukraine [1], the total supply of primary energy from biofuels and wastes in 2017 amounted to 3,046

thousand tons of oil equivalent, which is equivalent to replacing about 3.8 billion m³ of gas.

In addition, the data analysis conducted by the Bioenergy Association of Ukraine for the 2010–2017 period indicates that the average rate of bioenergy sector development in Ukraine is:

- 43 % per year according to «production of biofuels and wastes» indicator;
- 33 % per year by the indicator «Total supply of primary energy from biofuels and wastes».

Electricity production from biogas begins to develop dynamically in Ukraine. Thus, in the year the biogas capacity has increased from 34 MW – 2017 to 46 MW – 2018. (Figure 1). Particularly promising is the production of biogas from garbage. In Ukraine, about 10 million tons of waste are generated annually and there are almost 5.5 thousand dumps. Figure 2 shows the dynamics of growth of biomass capacity in Ukraine.

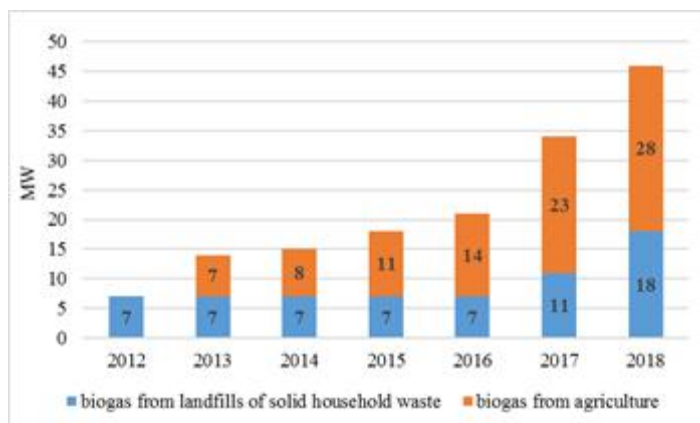


Figure 1 – Dynamics of growth of biogas capacities in Ukraine

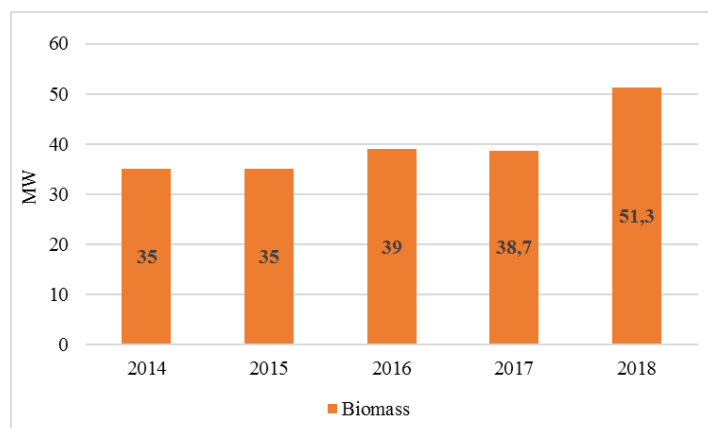


Figure 2 – Dynamics of growth of biomass capacities in Ukraine

According to the Energy Strategy of Ukraine [1–2], by 2035, Ukraine intends to reduce fossil fuels consumption and increase the share of renewable energy sources from 6.7 % (in 2017) to 25 % (in 2035) of the total primary energy supply. In Ukraine, biomass share from all renewable energy sources is 80 %, and it is expected that this share will remain the main one in future. Consequently, projects that replace fossil fuels (coal, natural gas) with biomass are popular in Ukraine now, and their number will increase in future.

Considering that combined heat and power production is a promising technology that largely solves energy saving problems and has been reflected on a legislative level in Ukraine. According to strategic goals [3–4] of the energy systems development for high-quality and safe energy supply with the predominant use of combined heat and power generation based on cogeneration technologies.

There is a need to ensure the effective functioning of unconventional and renewable energy sources and their integration with existing energy systems. The concept of an integrated power supply system is to combine elements of the energy infrastructure, in particular related to providing consumers with electricity and heat, thereby ensuring the exchange of power between previously separated systems.

The integrated power supply system provides the functions of receiving, supplying, converting and storing various types of energy. The concept of an integrated power supply system uses the concept of «energy hubs»,

which can be viewed as a generalization of the concept of network nodes in traditional electrical networks to a larger number of types of energy carriers, considering the possibility of their mutual transformation.

The problem of operating energy hubs is to ensure the optimal choice of the components of energy hubs and to ensure their integration into one system. Investigating the flows of various energy carriers, they perform an analysis of the interaction between sources of energy generation and end users [5–6]. In the article [7] is to solve a multi-objective model that includes reducing carbon emission and operation cost in the presence of real time demand response program (DRP).

This paper studies the optimal operation problem of an energy hub with multiple energy sources to serve stochastic electricity and heat loads in the presence of uncertain prices [8].

In order to determine the optimal levels of energy acquisition costs, the task of operational planning of the work of the various elements of the energy hub is important, which is decided on the operational time horizon. Development and implementation of approaches to optimize the functioning of such energy hubs are promising issues in the context of sustainable energy development in Ukraine, attracting new investments in non-traditional and renewable energy sources, stimulating the activity of an active consumer, ensuring regulatory quality of electricity, implementing the Smart Grid concept [9].

2. Energy hub optimal energy consumption planning

Analyzing technology development results of thermal and electric energy production from biomass, it is possible to propose a concept of an energy hub with bioenergy equipment.

2.1. A model of integrated energy supply system of agricultural enterprise functioning

Let's introduce a model of integrated energy supply system of agricultural enterprise functioning, which aim is the fullest possible use of its own energy sources. The main energy sources consumed by enterprise are electricity for equipment process operation, lighting systems, ventilation and needs of personnel, hot water for the heating system and other needs. In order to obtain these energy sources, following sources are used: electricity can be purchased from the grid, produced by wind turbines installed in an enterprise and generated on two cogeneration plants, one of which works on biogas, and the other on solid biomass. Hot water for the heating system is obtained at the cogeneration plants. Enterprise buys electricity at the market with hourly prices, it is also possible to sell generated electricity surplus at the market. A source of biogas is a biogas generator that works on stockbreeding waste. Biogas generator does not provide a possibility for significant volumes of biogas accumulation, so it is desirable to immediately burn all generated amount. Biomass is a crop residue remaining after harvest (e.g. straw) and can be stored for a long time for use in the cold season of the year.

2.1.1. Energy consumption

Electricity consumption is characterized by maximum consumption in daylight hours and low seasonality. Hot water consumption for heating correlates with the average daily temperature of the ambient air and maximum in the winter period. The purpose of agricultural enterprise energy supply system is such a mode of its functioning, when consumers needs in energy are fully met with the most effective financial indicators, that is the maximum difference between the proceeds for the sold and purchased electricity, since other energy resources are not bought by the enterprise.

2.1.2. The objective function and the limitation of the optimization model

According to the approach proposed in [10–11], we formulate the objective function and the limitation of the optimization model. The objective function will look like this

$$\sum_{k=0}^{T-1} c_{El}^S(k)P_{El}^S(k) - c_{El}^{In}(k)P_{El}^{In}(k) \rightarrow \max, \quad (1)$$

where $c_{El}^S(k)$, $c_{El}^{In}(k)$ – cost of electricity for the k -th time interval (hour), UAH / kWh;

$P_{El}^S(k)$, $P_{El}^{In}(k)$ – volume of sales and purchases of electricity at the k -th time interval (hour), kWh.

In addition to the economic criterion in determining the optimal modes of operation of the energy hub, environmental criterion can be considered. In this case, the objective function can be the minimization of CO2 emissions during the production and transportation of energy.

The objective function for the criterion for minimizing CO2 emissions will be as follows:

$$\alpha_{El} \sum_{k=0}^{T-1} [P_{El}^{In}(k) - P_{El}^S(k)] + \alpha_{BioGas} \sum_{k=0}^{T-1} P_{BioGas}^{CHP}(k) + \alpha_{BioMas} \sum_{k=0}^{T-1} P_{BioMas}^{CHP}(k) \rightarrow \min, \quad (2)$$

where α_{El} , α_{BioGas} , α_{BioMas} – CO₂ emissions for electricity generation in centralized power supply systems, as well as emissions from gas combustion in cogeneration units, kg/kWh.

A balance of income and consumption of energy is given in a form of restrictions. Various types of energy resources transformation will be represented by the transformation metric Θ . Also, the balance equation considers the possibility of energy accumulation (in batteries and electric insulated tanks of hot water). Considering approaches proposed in [12–13], the restrictions have a form:

$$\begin{aligned} E(k+1) &= E(k) + A^{ch} Q^{ch}(k) - A^{dis} Q^{dis}(k) - E_L, \\ L(k) &= \Theta P^{In}(k) - Q^{ch}(k) + Q^{dis}(k) - P^S(k), \\ P(k)^{\min} &\leq P^{In}(k) \leq P(k)^{\max}, \quad P(k)^{\min} \leq P^S(k) \leq P(k)^{\max}, \\ 0 &\leq Q_i^{ch}(k) \leq \delta_i^{ch}(k) Q_i^{\max}(k), \quad i = 1, \dots, M, \\ 0 &\leq Q_i^{dis}(k) \leq \delta_i^{dis}(k) Q_i^{\max}(k), \quad i = 1, \dots, M, \\ \delta_i^{ch}(k) + \delta_i^{dis}(k) &\leq 1, \quad i = 1, \dots, M, \\ E(k)^{\min} &\leq E(k) \leq E(k)^{\max}, \quad E_0 = E_T, \end{aligned}$$

where c – row vector denoting energy purchasing costs for each input power flow;

P^{In} – column vector denoting input flow of energy resources;

P^S – column vector denoting flow of energy resources sold;

L – column vector denoting output power flow;

Θ – converter coupling matrix, elements could be zeros, efficiencies or product of efficiencies;

P^{\min} , P^{\max} – column vector denoting minimum and maximum capacity limits for power flow;

Q^{ch} , Q^{dis} – column vectors denoting power exchanged with storing devices;

A^{ch} , A^{dis} – diagonal matrices for the charging and discharging efficiency of each storing device;

E – vector denoting level of the energy stored in the storing device;

E_L – vector denoting energy loss per time unit in the storing device;

E_0 – vector denoting the level of the energy stored in the storing devices at time $k = 0$;

Q_i^{\max} – a storage device capacity;

δ_i^{ch} , δ_i^{dis} – binary variables for each storing device which provide condition that storage device cannot be charged and discharged at the same time.

In addition to single-criterion objective functions, we consider a multicriteria approach to determining the optimal modes of operation of an energy hub. The task will be presented in the form

$$y \rightarrow \min, \quad F_1(P) - w_1 y \leq F_1^*, \quad F_2(P) - w_2 y \leq F_2^* \quad (3)$$

where $F_1(P)$ – objective function by economic criterion:

$$F_1(P) = \sum_{k=0}^{T-1} c_{El}^S(k) P_{El}^S(k) - c_{El}^{In}(k) P_{El}^{In}(k),$$

$F_2(P)$ – objective function by environmental criterion:

$$F_2(P) = \alpha_{El} \sum_{k=0}^{T-1} [P_{El}^{In}(k) - P_{El}^S(k)] + \alpha_{BioGas} \sum_{k=0}^{T-1} P_{BioGas}^{CHP}(k) + \alpha_{BioMas} \sum_{k=0}^{T-1} P_{BioMas}^{CHP}(k),$$

w_1 , w_2 – weighting factors expressing a measure of relative trade-offs between goals,

F_1^* , F_2^* – the value to which we strive to approximate the result of the objective functions.

2.1.3. Installations and output flows of the energy hub

Consider the energy hub shown in Figure 3. It consists of three converters, four streams of energy and storage devices. Converters: transformers 10/0,4 kV, electrical heating system and wind power plant. Energy flows: biogas, biomass, wind's energy, electric energy. Each of the three plants is characterized by its efficiency (efficiency of converting one form of energy to another).

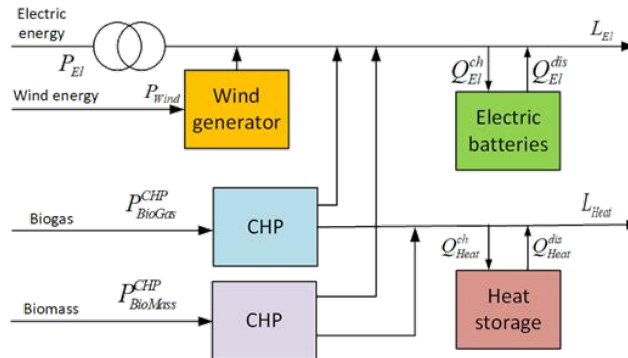


Figure 3 – Functional diagram of power hub for agricultural enterprise

Let's analyze possible sources of energy in an energy hub, as well as consumers of energy. Electricity can flow from the grid through lowering transformers 10/0,4 kV and be generated by a wind generator and cogeneration unit. Heat for a heating system may be generated from biogas and biomass. For the purposes of heat supply, energy is generated by an electrical heating system. Energy storage can occur in electric batteries. Hot water can accumulate in heat insulated tanks.

Matrix P , L , Θ , Q^{ch} , Q^{dis} , A^{ch} , A^{dis} for the selected object, such as an agricultural company was developed. Using the above considerations, we got:

$$P^{In} = \begin{bmatrix} P_{El}^{In} \\ P_{Wind} \\ P_{BioGas}^{CHP} \\ P_{BioMas}^{CHP} \end{bmatrix}, \quad P^S = \begin{bmatrix} P_{El}^S \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad L = \begin{bmatrix} L_{El} \\ L_{Heat} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Electricity is an input for transformer and electric heater P_{El} . Wind energy is an input for a windmill P_{Wind} . The biogas is an input for the cogeneration system (i.e. biogas turbine) P_{BioGas}^{CHP} and biomass is an input for cogeneration system P_{BioMas}^{CHP} . Energy consumers at the output of energy hub are domestic electricity consumers L_{El} and heating system L_{Heat} .

Installations and output flows of the energy hub are shown in Figure 1.

The transformer characterized by its electric efficiency ϖ_{PowSys} . A wind generator transforms the wind energy into electricity with energy conversion factor ϖ_{Wind} . A cogeneration system transforms the biogas into electricity, heat for heating systems; it is characterized by biogas-electric and biogas-heating systems energy conversion factor $\varpi_{CHP.El}^{BioGas}$ and $\varpi_{CHP.Heat}^{BioGas}$ respectively. A cogeneration system transforms the biomass into electricity, heat for heating systems; it is characterized by biomass-electric and biomass-heating systems energy conversion factors $\varpi_{CHP.El}^{BioMas}$ and $\varpi_{CHP.Heat}^{BioMas}$ respectively.

Converter coupling matrix, energy conversion factors or product of efficiencies:

$$\Theta = \begin{bmatrix} \varpi_{PowSys} & \varpi_{Wind} & \varpi_{CHP.El}^{BioGas} & \varpi_{CHP.El}^{BioMas} \\ 0 & 0 & \varpi_{CHP.Heat}^{BioGas} & \varpi_{CHP.Heat}^{BioMas} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

The coefficients included in the transformation matrix of energy resources characterize individual power plants processes and are determined by the following formulas

$$\varpi_{CHP.El}^{BioGas} = q_f^{BioGas} \eta_{Gen} \eta_{El}^{BioGas} k_T k_{Load},$$

$$\begin{aligned} \varpi_{CHP.Heat}^{BioGas} &= q_f^{BioGas} \eta_{Gen} \eta_{El}^{BioGas} k_T k_{Load} k_{Heat/EL}, \\ \varpi_{CHP.El}^{BioMas} &= q_f^{BioMas} \eta_{Gen} \eta_{El}^{BioMas} k_T k_{Load}, \\ \varpi_{CHP.Heat}^{BioMas} &= q_f^{BioMas} \eta_{Gen} \eta_{El}^{BioMas} k_T k_{Load} k_{Heat/EL}, \\ \varpi_{Wind} &= \eta_{Gen} \eta_{Mech} \eta_{Conv} \xi, \\ \varpi_{PowSys} &= \eta_{DistTr}, \end{aligned} \quad (6)$$

where q_f^{BioGas} – the value of a specific heat released during the complete combustion of biogas, J/m³, which depends on the sources (basins / deposits) of its extraction, the numerical values of the heat of combustion of fuel can be obtained from the International Energy Agency (IEA);

η_{Gen} – the conversion efficiency of the generator (synchronous or asynchronous), it is acceptable to take close to the value of 0.87–0.9;

η_{El}^{BioGas} – the electricity conversion efficiency at full biogas burning;

k_T – the electricity efficiency at full biogas burning;

k_{Load} – the coefficient, which shows the dependence of cogeneration unit efficiency on the level of loading – more loaded cogeneration unit, higher efficiency value of the cogeneration unit;

$k_{Heat/EL}$ – the ratio of the generated thermal energy to the electric cogeneration unit;

q_f^{BioMas} – the value of the specific heat released during the complete combustion of biomass, J/kg, which depends on the sources (pools / deposits) of its extraction, the numerical values of the heat of combustion of fuel can be obtained from the International Energy Agency (IEA);

η_{El}^{BioMas} – the electricity conversion efficiency, with complete combustion of biomass;

η_{Mech} – the mechanical conversion efficiency (enhancement gearbox) is at the level of 0.93–0.95;

η_{Conv} – the conversion efficiency of the converter unit, which includes the presence of a rectifier and / or inverter, can be taken as equal to 0.81-0.93;

ξ – the coefficient of wind energy used in calculating the power developed by the wind wheel, we accept 0.3-0.35;

η_{DistTr} – the 10/0.4 kV transformer conversion factor.

Energy storage can occur in electric batteries Q_{El}^{ch} . Heat can accumulate in heat insulated tanks Q_{Heat}^{ch} . Accordingly, can be used as the accumulated electricity Q_{El}^{dis} , as well as accumulated hot water for water supply system Q_{Heat}^{dis} .

$$\mathbf{Q}^{ch} = \begin{bmatrix} Q_{El}^{ch} \\ Q_{Heat}^{ch} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{Q}^{dis} = \begin{bmatrix} Q_{El}^{dis} \\ Q_{Heat}^{dis} \end{bmatrix}.$$

We also introduce a diagonal matrix \mathbf{A}^{ch} for the charging efficiency of each storing device and a diagonal matrix \mathbf{A}^{dis} for the discharging efficiencies:

$$\mathbf{A}^{ch} = \begin{bmatrix} \eta_{El}^{ch} & 0 \\ 0 & \eta_{Heat}^{ch} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A}^{dis} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\eta_{El}^{ch}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\eta_{Heat}^{ch}} \end{bmatrix}.$$

The values included in the matrix of energy input flows represent the consumption of energy resources for one sampling time interval (usually one hour) and have the following dimensions: P_{El}^{In} , P_{Wind} – kWh, P_{BioGas}^{CHP} – m³, P_{BioMas}^{CHP} – kg.

In addition, we introduce restrictions on the daily consumption of biogas in the form of equality of generation and combustion, and set the maximum daily volume of solid biomass burning. The corresponding restrictions will come in this form

$$\sum_{k=0}^{T-1} P_{BioGas}(k) = P_{BioGas.Tot}, \quad \sum_{k=0}^{T-1} P_{BioMas}(k) < P_{BioMas.Tot} \quad (7)$$

3. Simulation results analysis

Let's perform a numerical simulation of the considered power hub to evaluate the peculiarities of the results and model adequacy. The simulation will be performed for a duration of 24 hours with a sampling of 1 hour. Thus, the number of intervals is $T = 24$. Such a scenario can be considered typical, since during the operation of the power hub, statistics can be accumulated on the peculiarities of the daily schedules of the enterprise consumers load and it is quite possible to predict the next day energy demand. Forecasting of electric energy market prices can also be performed by one of the known methods [14–18].

For simulation purposes, used data on electricity market prices for one day, which are presented in Figure 4. Typical enterprise charts of electricity consumption and the power of heating system are shown in Figure 5.

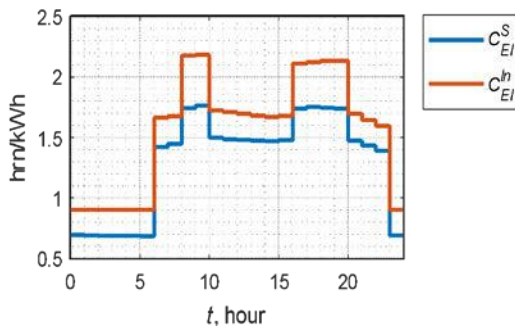


Figure 4 – Electricity market prices

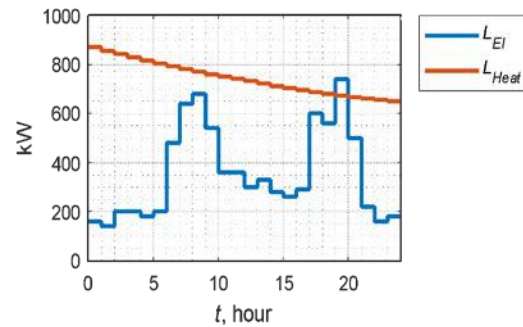


Figure 5 – Electric and heat power demand

The values of the energy conversion factors given in Table 1.

Table 1 – Values of transformation coefficients

| | PowSys | Wind | CHP ^{BioGas} | CHP ^{BioMas} |
|----------------|--------|---------|-----------------------|-----------------------|
| Electric Power | 0.95 | 0.26775 | 7.7328 | 5.13 |
| Heat | 0 | 0 | 11.5992 | 7.695 |

The maximum power values of the energy hub installations, which were used to run the simulation, is given in Table 2.

Table 2 – Maximum input power of the energy hub elements

| Distribution transformer, kVA | Wind farm, kW | Biogas CHP, m ³ /hour | Biomass CHP, kg/hour |
|-------------------------------|---------------|----------------------------------|----------------------|
| 2500 | 1000 | 300 | 3000 |

The capacity of electric storage batteries is assumed to be 500 kWh, and the amount of heat energy that can be stored in a heat-insulated tank is 5000 kWh.

For the case of using the environmental criterion, emissions from electricity generation can be calculated considering the national significance of the CO₂ emission factor for electricity according to [19] developed in 2013–2014 by the Joint Energy and Transport Research Center (European Commission), which for Ukraine is 0.924 kg/kWh. For the case of gas combustion in cogeneration plants, the average value for this type of equipment was taken.

In order to take into account, the volumes of electricity generated by the wind turbine, one must take into account the daily volatility of the wind. It is not possible to predict the direction of wind speed on an hourly basis;

therefore, it is proposed to perform simulation modeling of wind power plants based on statistical data measured for this object.

Simulation of the optimization problem was performed using MATLAB's Optimization Toolbox package. The results using only economic criterion are shown in Figures 6–12.

On Figure 8 positive values of P_{EI} correspond to the purchase of electricity in the market (P_{EI}^{In}) negative – the sale of electricity (P_{EI}^S).

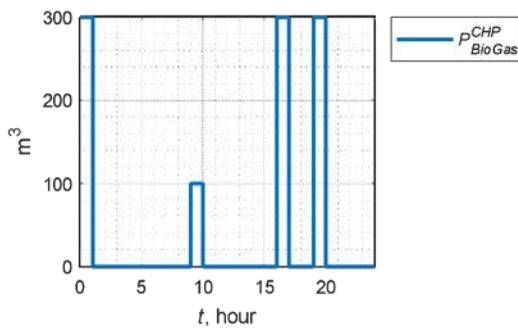


Figure 7 – Biogas CHP productivity

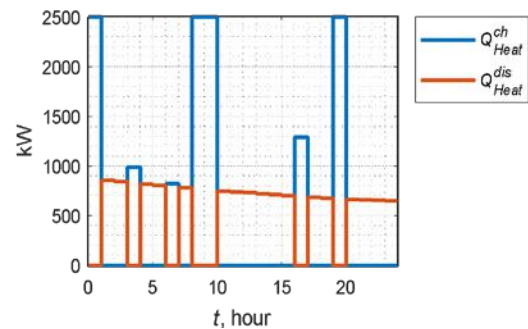


Figure 11 – Power exchange with heat storage

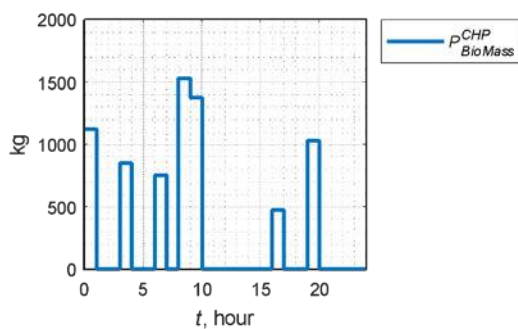


Figure 8 – Biomass CHP productivity

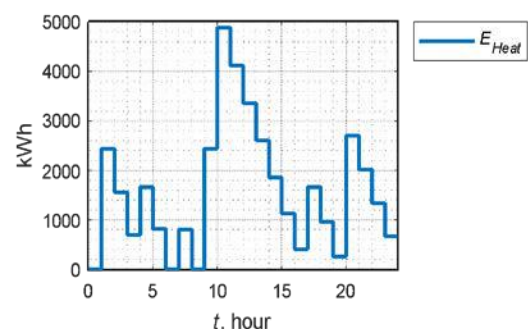


Figure 10 – Energy stored in heat storage

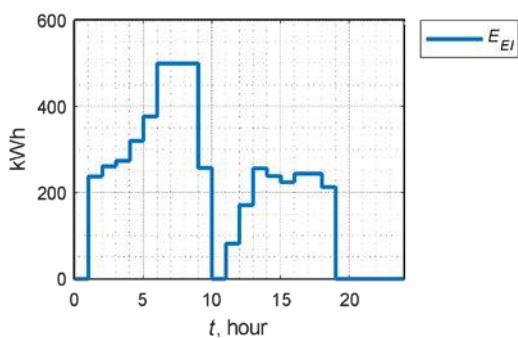


Figure 9 – Energy stored in electric accumulator

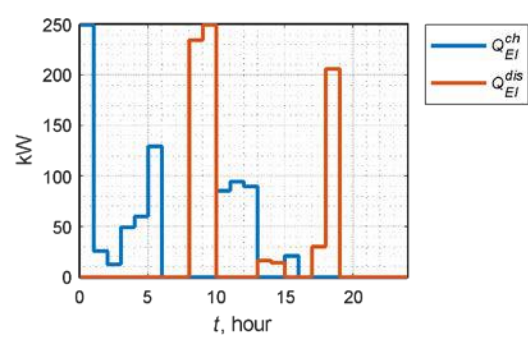


Figure 12 – Power exchange with electric accumulator

As can be seen from the graphs, the surplus of generated electricity was observed during the day. This is due to the need to provide a fairly significant constant demand for heat, which is covered by the work of cogeneration units. Combustion of biogas was not enough to produce the required amount of thermal energy; therefore, a biogas cogeneration plant should operate almost all the time, and biogas installation is included only in certain hours.

The graphs show that the presence of electricity and thermal energy storages has enabled better use of available energy resources and facilities. Figure 10 and 13 indicate intense accumulation of energy in batteries in

hours of minimum power system, when the market price is minimal. At the same time, in the hours of maximum loads, the accumulated electricity is sold at the most favorable price. Also, in these hours, we observe peak performance of energy that contributes the most advantageous electricity sales. The received heat excess is accumulated in a thermal accumulator.

The results using only ecological criterion are shown in Figures 13–16. It can be seen that in this scenario, the volume of exchange of electricity with the power grid has significantly decreased. Electricity on the market is sold significantly less, which leads to a decrease in the total profit of the energy hub, which is expected because the economic criterion is not considered. It can also be seen that the loading of the cogeneration unit on biomass has become more uniform, and the heat accumulators are used significantly less. Electric batteries for the use of ecology criterion are also practically not used.

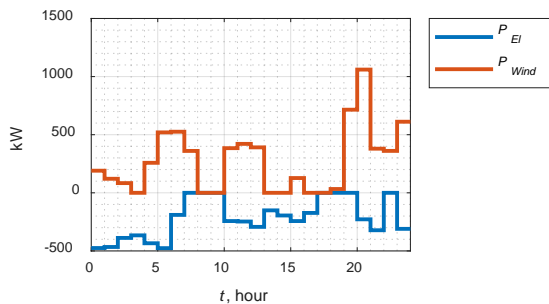


Figure 13 – Electric power exchange with power system and generated on the wind generator using only ecological criterion

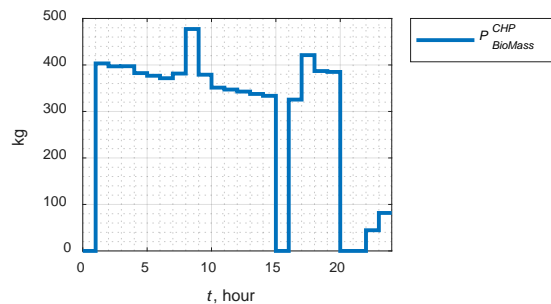


Figure 15 – Biomass CHP productivity using only ecological criterion

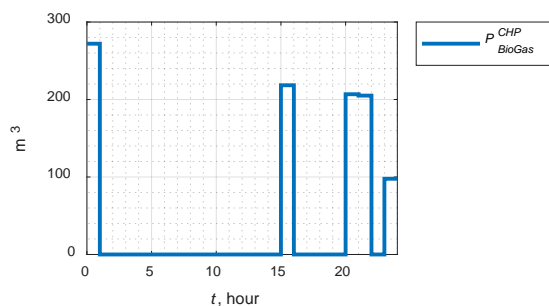


Figure 14 – Biogas CHP productivity using only ecological criterion

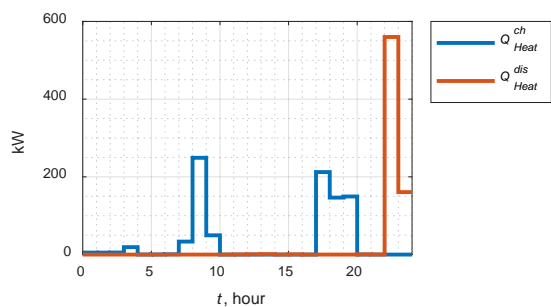


Figure 16 – Power exchange with heat storage using only ecological criterion

The results using multicriteria approach are shown in Figures 17–20.

The value of the objective functions obtained for the various study cases are presented in Table 3. As can be seen from Table 3, when using the economic criterion, CO₂ emissions are significantly higher than the minimum achievable value. Similarly, for an ecology criterion, energy hub profit is 30 % less than the optimal one. At the same time, sharing the two criteria allows for an effective compromise, in which profit are only 8 % less than optimal, with CO₂ emissions close to the minimum.

An interesting scenario of using the proposed model is the selection of optimal parameters of the power hubs elements. For example, the actual task is to select the capacity of storage batteries [20] for the electricity accumulation.

With the growth of this capacity, increases the power supply system's opportunities to redistribute the amount of electricity consumed and sold during the day and accordingly, the economic effect of its purchase and sale prices.

Table 3 – Values of the objective functions for different criteria

| | Economic criterion | Ecology criterion | Multicriteria approach |
|-----------------------------------|--------------------|-------------------|------------------------|
| Energy hub profit, UAH/day | 10550 | 7294 | 9678 |
| CO ₂ emissions, kg/day | 11703 | 8331 | 8407 |

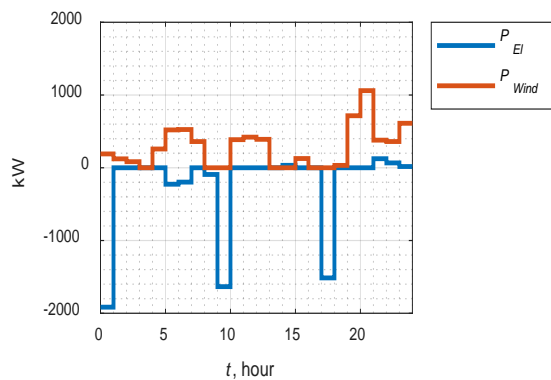


Figure 17 – Electric power exchange with power system and generated on the wind generator using multicriteria approach

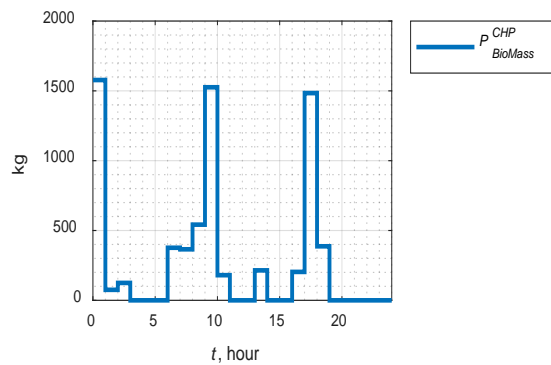


Figure 19 – Biomass CHP productivity using multicriteria approach

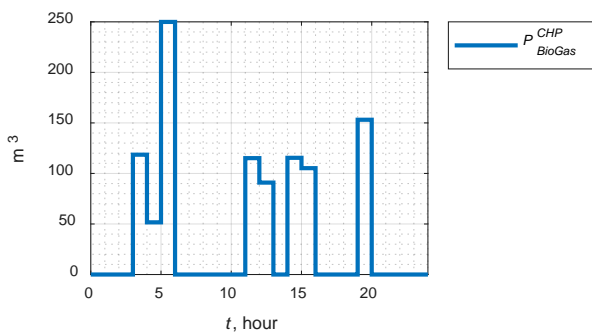


Figure 18 – Biogas CHP productivity using multicriteria approach

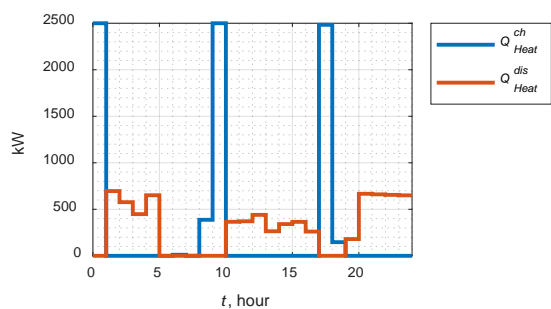


Figure 20 – Power exchange with heat storage using multicriteria approach

Using the proposed model, it is possible to estimate the influence of the energy hubs elements parameters on the value of the target optimization function, which in fact is the profit of the enterprise. For this purpose, a multiple simulation of the operation mode of the considered power hub was performed at the values changes of the electric battery capacity. The results are shown in Figure 21.

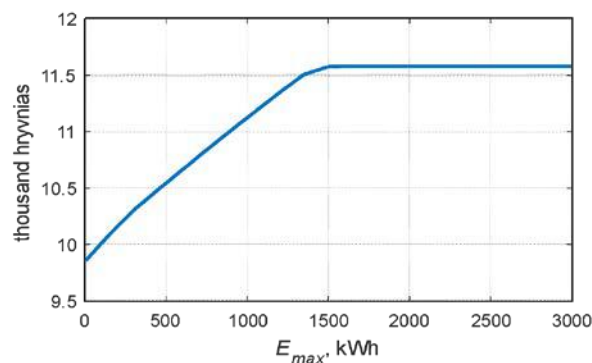


Figure 21 – Mode of the energy hub operation while changing the values of the electric battery capacity

It can be seen that with an increase of the battery capacity to 1500 kWh, the profit from electricity sales increases from 9.8 thousand UAH to 11.6 thousand UAH. However, with a further increase of the battery capacity, the profit remains unchanged. It can be concluded that with the energy consumption values and the parameters of the energy hub, which were used in the simulation, the most expedient batteries capacity is just 1500 kWh.

The designed energy hub system with the use of renewable energy sources (wind, biomass) in the modern conditions, enables effective use of the bioenergy potential of agricultural enterprises in Ukraine.

4. Conclusions

The energy sector of the country depends on the degree of energy resources diversification used to meet its energy needs. The development of bioenergy is an important part of ensuring the energy security of many countries, as it enables to reduce fossil fuel consumption, dependence on imported energy sources and ensure sustainable local energy supply. At the same time, the restructuring of power generation on the basis of decentralized power generating capacities of renewable energy sources into energy hubs enables the efficient use of energy resources.

Usage of a cogeneration plant in the structure of the energy hub gives the opportunity to provide energy resources and the possibility of generated electricity trading. A multicriteria approach to the planning and optimization of the operation of such energy hub is proposed. According to the simulation results using the example of an energy hub, it is shown that this method is suitable for planning hourly energy consumption with a compromise in terms of the minimum cost of these energy resources and CO₂ emissions.

References

1. Bioenergy Association of Ukraine. URL: <http://uabio.org>.
2. State Agency on Energy Efficiency and Energy Saving of Ukraine. URL: <http://sae.gov.ua>.
3. Geleznaia T., Oleinic E., Geletuha A. Prospects for the production of electricity from biomass in Ukraine. *Industrial Heat*. 2013. Vol. 35 (6). Pp. 67–75.
4. Haghifam M.-R., Pazouki S., Pazouki S. Renewables and Plug in Electric Vehicles modeling on electricity and gas infrastructures scheduling, 3rd International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems, 2–4 October 2013.
5. Veremiichuk Y., Prytyskach I., Yarmoliuk O., Mahnitko A., Varfolomejeva R. Analysis of the results of optimal energy consumption planning for residential complex energy hub. *IEEE 58th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University*, 12–13 October 2017.
6. Voropai N.I., Stennikov V.A., Barakhtenko E.A. Methodological principles of constructing the integrated energy supply systems and their technological architecture. *Journal of Physics: Conf. Series*. 2018. Vol. 1111.
7. Saberi K., Pashaei-Didani H., Nourollahi R., Zare K., Nojavan S. Optimal performance of CCHP based microgrid considering environmental issue in the presence of real time demand response. *Sustainable Cities and Society*. 2018.
8. Moazeni S., Miragha A.H., Defourny B. A risk-averse stochastic dynamic programming approach to energy hub optimal dispatch. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2018.
9. Moghaddam I.G., Saniei M., Mashhour E. A multi-slack Optimization Model for Scheduling Energy Hubs in Smart Grids. *Journal of Power Technologies*. 2018. Vol. 98 (3). Pp. 287-295.
10. Parisio A., Vecchio C., Vaccaro A. A robust optimization approach to energy hub management. *Electrical Power and Energy Systems*. 2012. Vol. 42. Pp. 98–104.
11. Bozchalui M. Optimal operation of residential energy hubs in smart grids. *IEEE Trans. Smart Grid*. 2012. Vol. 3. Pp. 1755–1766.
12. Rastegar M., Fotuhi-Firuzabada M., Lehtonen M. Home load management in a residential energy hub. *Electric Power Systems Research*. 2015. Vol. 119. Pp. 322–328.
13. Strelkov M. Static model of electricity market system composition. *Power engineering: economics, technique, ecology*. 2015. Vol. 3. Pp. 117–123.
14. Mahnitko A., Berzina K., Zamulko A., Veremiichuk Y., Nakhodov V. Research of Electrical Power Consumers Reaction in Power Consumption Management System. *The 9th International Scientific Symposium Elektroenergetika*, 12–14 September 2017.
15. Salvatore J. *World Energy Perspective. Cost of Energy Technologies* Bloomberg New Energy Finance. London: World Energy Council, 2013. 48 p.
16. *Cost and performance data for power generation technologies*. Black & Veatch Holding Company, prepared for National Renewable Energy Laboratory, 2012. 105 p.
17. Kostyuk V. The modified technique for levelized energy cost computing to provide deterministic and stochastic modeling of new generating facilities. *Power engineering: economics, technique, ecology*. 2015. Vol. 2. Pp. 64–77.
18. Veremiichuk Y., Prytyskach I., Yarmoliuk O., Opryshko V., Mahnitko A., Gerhards J., Berzina K. Energy hub functioning model considering perspectives for development of bioenergy in Ukraine. *IEEE 18th International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2nd Industrial and Commercial Power Systems Europe*. Italy, Palermo, 12–15 June 2018. Pp. 1–6.

19. Gabrielaitiene I., Melica G., Bertoldi P. How to develop the "Action Plan for Sustainable Energy Development (SEAP) in the cities of the Eastern Partnership and Central Asia JRS sciece and policy report JRC 90401. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2014.

20. Chaudhari K., Kandasamy N., Kanamarlapudi R., Gooi H. Abhisek Ukil Modeling of charging profiles for stationary battery systems using curve fitting approach. Industrial Electronics Society, 43rd Annual Conference of the IEEE. 29 October–1 November 2017.

Ю.А. Веремійчук, канд. техн. наук, **ORCID** 0000–0003–0258–0478

І.В. Притискач, канд. техн. наук, **ORCID** 0000–0002–1892–0054

О.С. Ярмолюк, канд. техн. наук, **ORCID** 0000–0001–8571–2573

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

МОДЕЛЬ ФУНКЦІОНУВАННЯ ІНТЕГРОВАНОЇ СИСТЕМИ ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ БЛОКІВ КОГЕНЕРАЦІЇ ТА ВРАХУВАННЯМ ПЕРСПЕКТИВ РОЗВИТКУ БІОЕНЕРГЕТИКИ В УКРАЇНІ

Актуальним на сьогодні є розвиток біоенергетики у структурі системи енергопостачання за умов розвитку відновлюваних джерел енергії та впровадження сучасних технологій в енергетиці. Розвиток біоенергетики є важливою складовою енергетичної безпеки багатьох країн, оскільки дає змогу зменшити споживання викопного палива та залежність від імпортованих джерел енергії, забезпечити постійне енергопостачання у безпосередній близькості до споживачів. У роботі представлено модель функціонування інтегрованої системи енергопостачання (energy hub) з залученням когенераційних установок при врахуванні перспектив розвитку біоенергетики в Україні. Основним завданням було у повній мірі використати власні джерела енергії energy hub для задоволення потреб споживачів в енергоносіях з найефективнішими фінансовими показниками. Наявність засобів акумулювання електричної та теплової енергії дасть можливість більш ефективно використовувати наявні енергоресурси й обладнання (технології). Використання когенераційної установки в структурі energy hub дає змогу забезпечити енергоресурсами споживачів та можливість продажу надлишку електроенергії у мережу. У роботі запропоновано багатокритеріальний підхід для планування й оптимізації роботи energy hub. Запропонована система energy hub з використанням відновлюваних джерел енергії (вітер, біомаса) у сучасних умовах дасть можливість ефективно використовувати біоенергетичний потенціал сільськогосподарських підприємств в Україні. Відповідно до результатів моделювання на прикладі energy hub, показано, що цей спосіб підходить для прогнозування погодинного споживання енергії з точки зору мінімальної вартості енергоресурсів та викидів CO₂. Цікавим сценарієм використання запропонованої моделі energy hub є підбір оптимальних параметрів елементів живлення.

Ключові слова: інтегровані розподільні енергосистеми, розподільна генерація, активний споживач, технологія когенерації, energy hub, мікромережа на основі когенерації, біомаса, біогаз.

Надійшла 27.04.2019

Received 27.04.2019

ТЕХНОЛОГІЇ ТА ОБЛАДНАННЯ В ЕНЕРГЕТИЦІ TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT IN ENERGETICS

УДК 621.311

Т. Л. Кацадзе, канд. техн. наук, доц. ORCID 0000-0002-8365-0046

О. М. Паненко, асист. ORCID 0000-0002-6093-6607

О. М. Янковська, ст. викладач ORCID 0000-0002-6824-9270

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

МУЛЬТИАГЕНТНЕ УПРАВЛІННЯ ОПТИМАЛЬНИМ РОЗМІКАННЯМ РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ

В статті наведено аналіз проблем оперативного ведення режимів розподільних електричних мереж напругою 6-110 (150) кВ. Показано економічну доцільність та технічну можливість забезпечення надійності та безперервності електропостачання у разі розмикання контурів електричних мереж напругою 110 (150) кВ. Обґрунтовано особливу актуальність проблеми розмикання замкнених контурів в сучасних неоднорідних електричних мережах, які знаходяться у веденні операторів електричних мереж різного ієрархічного рівня. Показано можливості та перспективи формування децентралізованої мультиагентної системи управління конфігурацією розподільних електричних мереж в режимі реального часу. Представлено основні положення розробленого математичного апарату підтримки рішень локальної системи управління оптимальним розмиканням розподільних електричних мереж, які дозволяють адаптувати конфігурацію мережі відповідно до поточних умов режиму електричної системи. На прикладі моделювання режимів електричних мереж напругою 110-750 кВ Південної енергосистеми ОЕС України показано, що застосування пропонуваного підходу дозволить знизити втрати енергії в електричній мережі протягом року на 3-5%.

Ключові слова: неоднорідна електрична мережа, розподільна електрична мережа, оптимальне управління, мультиагентна система управління, прийняття рішень в режимі реального часу

Вступ Забезпечення надійного та якісного електропостачання в розподільних електричних мережах напругою 6-35 кВ на сучасному етапі вимагає створення «розумних» електричних мереж, здатних адаптувати свої параметри до поточних умов роботи наявних джерел живлення, під'єднаних споживачів тощо [1]. Водночас вирішення проблеми інтелектуалізації управління ускладнено великою розмірністю та розгалуженістю розподільної мережі, низькою спостереженістю її режиму, обмеженим набором заходів адаптивного управління.

Відповідно до чинних Норм технологічного проектування електричних мереж розподільні електричні мережі за своєю структурою є замкненими, проте їх експлуатують за розімкненими схемами, що зумовлене вимогами зниження струмів короткого замкнення та однофазного замикання на землю, необхідністю розривання контурів протікання зрівнювальних струмів в неоднорідних мережах, зменшенням кількості аварійних відключень тощо. Загалом задача вибору місць розмикання кільцевих та петлевих схем розподільних електричних мереж є складною багатокритеріальною задачею, цільова функція якої має враховувати обмеження щодо показників надійності електропостачання, якості електричної енергії на затискачах споживачів, втрати енергії на її транспортування тощо. Слід зазначити, що на етапі експлуатації розподільних електричних мереж на передові позиції виходить критерій економічності режиму системи електропостачання. Справа в тому, що зміна положення резервної перемички в робочій схемі електричної мережі майже не впливає на показники надійності електропостачання, а підвищення економічності режиму, зазвичай, обумовлює одночасне покращення якості електричної енергії за напругою на затискачах споживачів.

Для реалізації економічних режимів розподільних електричних систем напругою 6–35 кВ персонал

підприємств щорічно, або декілька разів на рік проводить оптимізаційні розрахунки та розробляє нормальну комутаційну схему експлуатації мережі. Реалізація таких заходів дозволяє оптимізувати втрати активної потужності в розподільній електричній мережі для усередненого режиму її роботи. Проте, відхилення поточного режиму електричної мережі від усередненого визначає зниження економічності режиму та обумовлює додаткові втрати активної потужності в мережі. Відомо, що втрати енергії в розподільних електричних мережах України складають 10% та вище, що значно більше втрат в магістральних електричних мережах вищих класів номінальної напруги. Очевидно, оптимальне оперативне управління розмиканням кільцевих схем розподільних мереж відповідно до поточних умов роботи електричної системи дозволить зменшити витрати ресурсів на покриття втрат електричної енергії.

Інша ситуація має місце в електричних мережах напругою 110 (150) кВ. Виходячи з вимог надійності електропостачання такі електричні мережі експлуатують за замкненими схемами, що визначає протікання в контурах електричних мереж паразитних струмів, обумовлених неоднорідністю увімкнених на паралельну роботу у складі ОЕС електричних мереж різних класів номінальної напруги. Це призводить до істотного погіршення техніко-економічних показників режимів електричних мереж, зокрема до збільшення втрат активної потужності та зниження пропускної здатності електричних мереж в цілому [2, 3].

Насьогодні відомий широкий спектр заходів, спрямованих на часткову або повну компенсацію неоднорідності електричних мереж, зокрема зміна геометричних характеристик повітряних ліній електропередавання, застосування пристроїв поздовжньої компенсації параметрів електропередач, використання додаткових джерел реактивної потужності, застосування фазоповоротних трансформаторів і лінійних регуляторів, зміна коефіцієнтів трансформації силових трансформаторів й автотрансформаторів та інші сучасні технології гнучких електропередач [2, 4]. Одним з найдієвіших заходів, направлених на компенсацію проявів неоднорідності електричних мереж є розмикання контурів [2]. Це дозволяє усунути шляхи для протікання паразитних струмів і, як наслідок, покращити техніко-економічні показники режимів електричних мереж. Разом з тим, застосування даного заходу обмежене зниженням надійності та безперервності електропостачання у разі експлуатації електричних мереж за розімкненою схемою, що вважається недопустимим для мереж напругою 110 (150) кВ. Водночас, впровадження сучасних швидкодіючих комутаційних апаратів із збільшеним механічним ресурсом дозволяє використовувати розмикання контурів 110 (150) кВ для обмеження негативних проявів неоднорідності складнозамкнених електричних мереж, якщо застосування такого заходу не призводить до недопустимого зниження надійності електропостачання.

Слід зауважити, що ситуація із впровадження заходів, направлених на компенсацію негативних проявів неоднорідності електричних мереж, погіршується тим, що магістральні електричні мережі напругою 330-750 кВ та розподільні мережі 110 (150) кВ знаходяться у веденні різних операторів електричних мереж. В результаті оператори магістральних електричних мереж не зацікавлені у вирішенні проблеми неоднорідності, оскільки для неоднорідних мереж характерне розвантаження електропередач вищих класів номінальної напруги та покращення техніко-економічних показників режимів магістральних електричних мереж за рахунок істотного погіршення показників розподільних мереж, які знаходяться у веденні операторів обленерго. З урахуванням того, що магістральні електричні мережі знаходяться на вищому ієрархічному щаблі в структурі передачі та розподілу електроенергії, очевидно, можливість централізованого вирішення проблеми неоднорідності електричних мереж істотно ускладнюється.

Таким чином, впровадження концепції SmartGrid в сучасних розподільних електричних мережах зумовлює необхідність вирішення проблеми зміни топології робочої схеми мережі в режимі реального часу відповідно до поточних умов режиму передавання електричної енергії.

Мета роботи полягає у формуванні загальних принципів створення мультиагентної системи децентралізованої системи управління конфігурацією розподільної електричної мережі та розробці математичного апарату підтримки рішень локальної системи управління оптимальним розмиканням розподільних електричних мереж, які дозволяють адаптувати конфігурацію мережі відповідно до поточних умов режиму електричної системи в режимі реального часу.

Матеріали досліджень Оптимізаційна задача вибору місць розмикання робочих схем електричних мереж відома давно. Відомі методи розв'язання такої задачі поділяють на дві групи. До першої групи відносять класичні методи, в яких пошук оптимального рішення починають з повністю замкненої робочої схеми, розмикаючи її в точках потокорозділу для оптимального режиму складнозамкненої схеми [2, 5]. В методах другої групи розв'язання задачі починають з деякого початкового стану розімкненої схеми,

організуючи направлений пошук оптимального рішення. Нову точку розмикання визначають виходячи із умови зниження втрат електричної енергії в мережі [6-8].

У будь-якому разі відомі методи оптимізації розмикання електричних мереж передбачають централізований підхід до виконання відповідних систем управління, що практично унеможливає здійснення оптимальних комутаційних перемикань в режимі реального часу через надвеликі обсяги інформації, яка має поступати до центрів управління, дефіцит часу для прийняття рішень тощо. Очевидно, доцільно використовувати альтернативний децентралізований підхід, який базується на принципах мультиагентного управління розподільною електричною мережею [9-12]. Тут управління оптимальними комутаційними перемиканнями здійснюється окремими агентами, яким для прийняття рішень достатньо збирати режимну інформацію тільки із суміжної мережі та обмінюватися інформацією тільки із сусідніми агентами.

Відомі основні вимоги до формування мультиагентної системи управління оптимальними оперативними перемиканнями конфігурації розподільної мережі [11]:

- 1) локальність контролю режиму (агент збирає інформацію про режимні параметри тільки суміжної з ним частини електричної мережі);
- 2) локальність обміну інформації (агент обмінюється інформацією тільки із суміжними агентами);
- 3) мінімальний обмін інформацією між агентами;
- 4) непогіршення функціональності системи електропостачання внаслідок прийняття рішень щодо переконфігурації розподільної мережі окремим агентом.

Для формування такої мультиагентної системи управління розроблено математичний апарат підтримки рішень з оптимальної оперативної перекомутації робочої схеми, яке забезпечить мінімум втрат активної потужності для поточного режиму навантажень розподільної мережі.

Нехай задана деяка вихідна схема розподільної електричної мережі із відомими положеннями місць розмикання контурів, як показано на рис. 1. На рис. 1 розімкнені ділянки показано пунктирними лініями. Замикання будь-якого комутаційного апарату призведе до утворення кільцевої схеми, отже відносно будь-якого місця розмикання робочу схему розподільної мережі можна представити лінією з двобічним живленням, представлену, наприклад, на рис. 2.

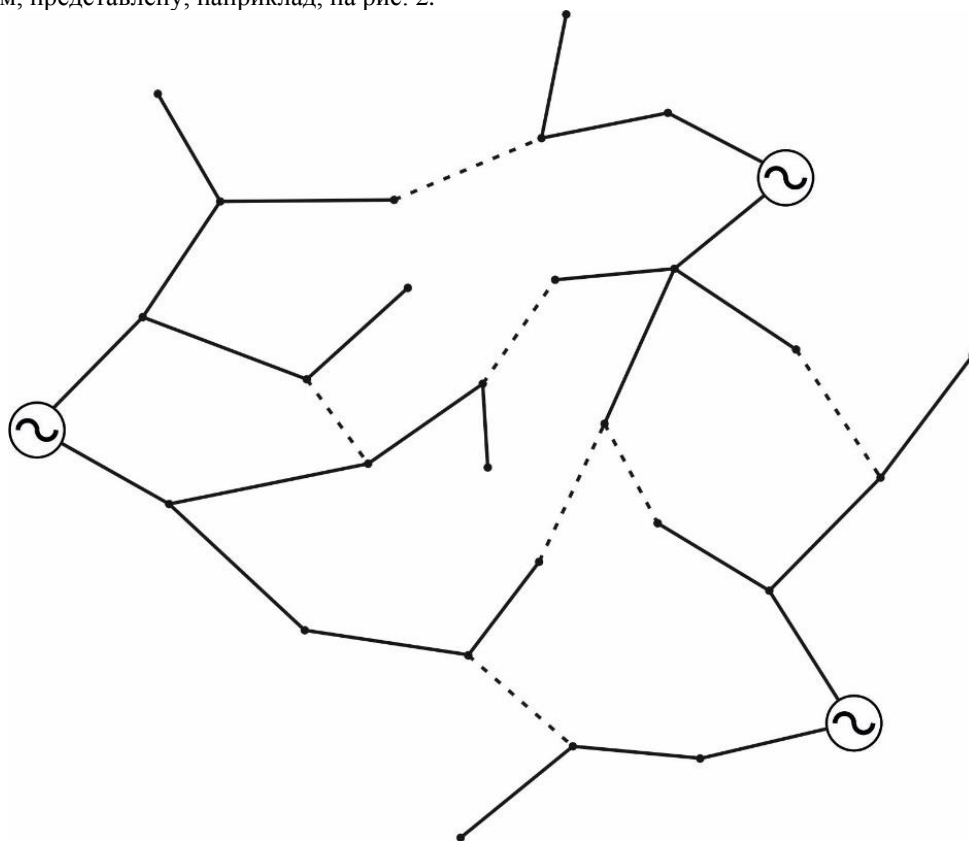


Рис. 1. Схема розподільної електричної мережі

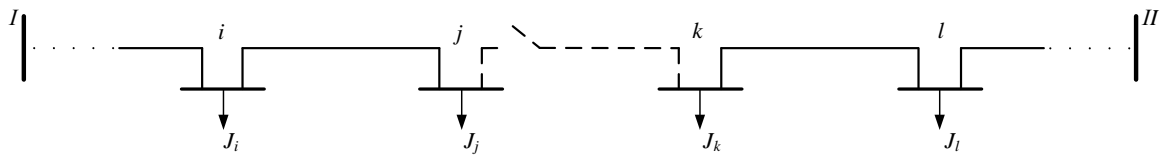


Рис. 2. Фрагмент секціонованої лінії з двобічним живленням

Основна ідея пропонованого підходу полягає в підтримці максимально високого профілю напруги в розподільній електричній мережі серед усіх режимів за різної конфігурації робочої схеми. Зазначимо, що одночасно із зменшенням втрат активної потужності в розподільній електричній мережі буде покращуватись якість електричної енергії за напругою.

Нехай, відповідно до поточного способу секціонування лінії з двобічним живленням, споживачі ТП i та j отримують живлення від джерела I , а ТП k та l – від джерела II . Перенесення місця розмикання схеми на один крок визначає переведення живлення споживачів відповідної трансформаторної підстанції з одного фідера на інший. Реконфігурація робочої схеми, що полягає в переведенні живлення споживачів j -ї ТП до джерела II , очевидно, призводить до збільшення профілю напруги з боку джерела I і, одночасно, до зниження профілю з боку джерела II . Очевидно, що втрати активної потужності в розподільній мережі будуть меншими у разі, якщо профіль напруги в пунктах схеми буде найвищим серед всіх можливих способів розмикання робочої схеми, тобто реконфігурація схеми буде доцільною у тому разі, коли збільшення профілю з боку джерела I буде більшим, ніж його зменшення з боку джерела II , і в цілому по схемі профіль напруги збільшиться. Розглянемо даний підхід детальніше.

Можна показати, що оптимальне положення вимкненої ділянки лінії з двобічним живленням характеризується найменшою можливою різницею напруг пунктів, які обмежують дану ділянку

$$U_j - U_k = \min.$$

Переведення живлення j -ї ТП на джерело II супроводжується збільшенням напруги на шинах i -ї ТП відповідно до виразу закону Ома

$$\dot{U}'_i = \dot{U}_i + \dot{J}_j \underline{Z}_{I-i},$$

де U_i – напруга на шинах i -ої ТП у вихідній схемі (до здійснення оперативних перемикачів); J_j – струм навантаження j -ї ТП; Z_{I-j} – сумарний опір ділянок лінії між джерелом I та j -ю ТП.

Напруга на шинах j -ї ТП після здійснення оперативних перемикачів становитиме

$$\dot{U}'_j = \dot{U}_k - \dot{J}_j \underline{Z}_{II-j},$$

де U_k – напруга на шинах k -ї ТП у вихідній схемі; Z_{II-j} – сумарний опір ділянок лінії між джерелом II та j -м пунктом.

Різниця напруг пунктів, які обмежують вимкнену ділянку після здійснення перемикачів становитиме

$$\dot{U}'_i - \dot{U}'_j = (\dot{U}_i + \dot{J}_j \underline{Z}_{I-i}) - (\dot{U}_k - \dot{J}_j \underline{Z}_{II-j}) = \dot{U}_i - \dot{U}_k + \dot{J}_j \underline{Z}_{I-II}^{i-j},$$

де $\underline{Z}_{I-II}^{i-j}$ – сумарний опір лінії з двобічним живленням за виключенням ділянки $i-j$.

Оперативні перемикачання будуть доцільними у тому разі, коли задовольнятиметься умова:

$$U'_i - U'_j < U_j - U_k,$$

або

$$|\dot{U}_j - \dot{U}_i| > |\dot{J}_j \underline{Z}_{I-II}^{i-j}|. \quad (1)$$

Аналогічний критерій можна сформулювати для обґрунтування переведення живлення споживачів k -ї ТП до живлення від джерела I :

$$|\dot{U}_k - \dot{U}_l| > |\dot{J}_k \underline{Z}_{I-II}^{k-l}|. \quad (2)$$

Зауважимо, що залучення пропонованого підходу до реконфігурації розподільних електричних мереж напругою 110 (150) кВ в режимі реального часу відповідно до поточних умов режиму електричної системи допустим тільки у тому разі, якщо секціонування таких мереж не зумовить неприпустимого зниження надійності електропостачання.

Висновки Вирішення проблеми інтелектуалізації управління ускладнено великою розмірністю та розгалуженістю розподільної мережі, низькою спостереженістю її режиму, обмеженим набором заходів адаптивного управління.

Впровадження концепції SmartGrid в сучасних розподільних електричних мережах зумовлює необхідність вирішення проблеми адаптації топології робочої схеми мережі до поточних умов режиму передавання електричної енергії в режимі реального часу.

Відомі методи оптимізації розмикання електричних мереж передбачають централізований підхід до виконання відповідних систем управління, що практично унеможлиблює здійснення оптимальних комутаційних перемикачів в режимі реального часу, тому доцільним виявляється застосування децентралізованого підходу, який базується на принципах мультиагентного управління розподільною електричною мережею.

Показано, що оперативна оптимізація місць розмикання розподільних електричних мереж одночасно обумовить покращення якості електричної енергії за відхиленням напруги.

Розроблено математичний апарат підтримки рішень мультиагентною системою управління оперативною реконфігурацією розподільних електричних мереж.

Запропонований підхід до формування мультиагентної системи управління конфігурацією розподільних електричних мереж проілюстровано на схемі неоднорідних електричних мереж 110-750 кВ Південної енергосистеми ОЕС України. Проказано, що розмикання контурів 110 (150) кВ обумовить зниження втрат активної потужності на 9,5 %, а втрат енергії протягом року орієнтовно на 8%. Оперативна адаптація робочої схеми розподільних мереж додатково зменшує втрати енергії на 3-5 % протягом року.

Список використаної літератури

1. Стогній Б.С. Інтелектуальні електричні мережі електроенергетичних систем та їхнє технологічне забезпечення / Б.С. Стогній, О.В. Кириленко, С.П. Денисюк // Технічна електродинаміка. – 2010. – № 6. – С. 44–50.
2. Холмский В. Г. Расчет и оптимизация режимов электрических сетей. / В. Г. Холмский. – М.: Высшая школа, 1975. – 280 с.
3. Кацадзе Т. Л. Электричні системи і мережі. Розрахунок та аналіз усталених режимів електроенергетичних систем: Навчальний посібник / Т. Л. Кацадзе, В. В. Кирик. – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 212 с.
4. Лежнюк П. Д. Оптимальне керування потоками потужності і напругою у неоднорідних електричних мережах / П. Д. Лежнюк, В. В. Кулик: Монографія. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2003. – 188 с.
5. Железко Ю. С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии / Ю. С. Железко. – Москва: ЭНАС, 2009. – 456 с.
6. McDermott T. E. A Heuristic Nonlinear Constructive Method for Electric Power Distribution System Reconfiguration / Thomas E. McDermott. – Blacksburg, Virginia, 1998. – 66 pp.
7. Multiobjective Optimization Algorithm for Switch Placement in Radial Power Distribution Networks / J. R. Bezerra, G. C. Barroso, R. S. Leão, R. F. Sampaio. // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2015. – Vol. 30 №2. – P. 545–552.
8. Кацадзе Т. Л. Применение аппарата генетических алгоритмов для принятия проектных решений по развитию электроэнергетических систем / Т. Л. Кацадзе, В. Н. Сулейманов, В. А. Баженов // Энергетика: економіка, технології, екологія. – 2013. – № 2. – С. 58 – 65.
9. Інформаційне та нормативне забезпечення організації мультиагентного керування електроенергетичної системи із активним споживачем / О. В. Кириленко, С. П. Денисюк, С. Є. Танкевич, Т. М. Базюк. // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2016. – №1. – С. 29–34.
10. Manickavasagam K. Intelligent Energy Control Center for Distributed Generators Using Multi-Agent System / Krishnan Manickavasagam. // IEEE Transactions on Power Systems. – 2015. – Vol. 30, №5. – P. 2442 – 2449.
11. Фишов А. Г. Реконфигурация электрических сетей с распределённой генерацией и мультиагентным управлением / А. Г. Фишов, Б. Б. Мукатов. // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2015. – №9. – С. 143–152.

12. Кацадзе Т. Л. Принципи організації мультиагентного управління оптимальним розмиканням розподільних електричних систем / Т. Л. Кацадзе. // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2017. – №6. – С. 66–70.

T. Katsadze, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0002-8365-0046

O. Panienko, TF, ORCID 0000-0002-6093-6607

O. Iankovska, Assis. Prof., ORCID 0000-0002-6824-9270

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

MULTIPLE AGENT MANAGEMENT BY DISTRIBUTION ELECTRIC NETWORKS OPTIMAL DISPATCH

Solving the problem of management intellectualization is complicated by the large dimensionality and branching distribution network, low monitoring of its regime and limited set of adaptive management measures. Introduction the SmartGrid concept in modern distribution power networks makes it unnecessary to solve the problem of adaptation the topology of the working scheme to the electricity transmission mode current conditions in real time. The paper substantiates the special urgency of the problem of closing closed circuits in modern heterogeneous electrical networks, which are maintained by operators of electric networks of different hierarchical levels.

Known methods of optimization disconnection of electrical networks provide a centralized approach to the relevant control systems that practically impossible to implement optimal commutation switching in real time. Therefore, it is expedient to use a decentralized approach, based on the principles of multi-agent management of the distribution grid.

Obviously, operative optimization of the places of unplugging of distributive electric networks will cause the improvement of the quality of electric energy by voltage deviation. This situation has fallen to the basis of the developed mathematical apparatus supporting decisions by the multi-agent system of operational reconfiguration of distribution electrical networks.

The proposed approach to the formation of a multi-agent control system for the configuration of distribution electrical networks is illustrated in the scheme of heterogeneous electrical networks 110-750 kV of the Southern power grid of UPS Ukraine. It is stated that the opening of circuits 110 (150) kV will result in decrease of active power losses by 9.5%, and energy losses during the year is approximately 8%. The operational adaptation of the working circuit of distribution networks further reduces energy losses by 3-5% during the year.

Keywords: *heterogeneous electrical network, power distribution network, optimal control, multi-agent control system, making decisions in real time*

References

1. Stogniy B. Intelligent electric mains of electrical power systems and their technological support / B. Stogniy, O. Kyrylenko, S. Denysiuk // Technical electrodynamics. – 2010. – № 6. – p. 44–50.
2. Kholmisky V. Calculation and optimization of electric networks modes / V. Kholmisky. – Vyschaya shkola, 1975. – 280 p.
3. Katsadze T. Electrical systems and networks. Calculation and analysis of the power systems established modes / T. Katsadze, V. Kyryk – Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2018.-212 p.
4. Lezhniuk P. Optimal control of power flows and voltage in heterogeneous electrical networks / P. Lezhniuk, V. Kulyk. – Vinnytsia: UNIVERSUM-Vinnytsia, 2003. – 188 p.
5. Zhelezko Yu. Losses of electric power. Reactive power. Electricity quality / Yu. Zhelezko. – Moscow: ENAS, 2009. – 456 p.
6. McDermott T. E. A Heuristic Nonlinear Constructive Method for Electric Power Distribution System Reconfiguration / Thomas E. McDermott. – Blacksburg, Virginia, 1998. – 66 pp.
7. Multiobjective Optimization Algorithm for Switch Placement in Radial Power Distribution Networks / J. R. Bezerra, G. C. Barroso, R. S. Leão, R. F. Sampaio. // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2015. – Vol. 30 №2. – P. 545–552.
8. Katsadze T. The genetic algorithms application for decision making project of electric power systems development / T. Katsadze, V. Suleymanov, V. Bazhenov // Power engineering: economics, technology, ecology. – 2013. – № 2. – p. 58 – 65.
9. Information and regulatory support for multi-agent management of an energy system with an active consumer / O. Kyrylenko, S. Denisyuk, S. Tankevich, T. Bazuk. // Information Technology and Computer Engineering. – 2016. – №1. – p. 29–34.

10. Manickavasagam K. Intelligent Energy Control Center for Distributed Generators Using Multi-Agent System / Krishnan Manickavasagam. // IEEE Transactions on Power Systems. – 2015. – Vol. 30, №5. – P. 2442–2449.

11. Fischov A. Reconfiguration of distributed networks with multi-agent control / A. Fischov, B. Mukatov // Izvestiya Tomsk Polytechnic University. Engineering of geosources. – 2015. – №9. – p. 143–152.

12. Katsadze T. Organization Principles of Multi-Agent Control of Optimum Disposable Electric Power Distribution Systems / T. Katsadze // Bulletin of the Vinnitsa Polytechnic Institute. – 2017. – №6. – p. 66–70.

Т. Л. Кацадзе, канд. техн. наук, доц. **ORCID** 0000-0002-8365-0046

Е. Н. Паненко, асист. **ORCID** 0000-0002-6093-6607

Е. М. Янковская, ст. преподаватель **ORCID** 0000-0002-6824-9270

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

МУЛЬТИАГЕНТНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫМ РАЗМЫКАНИЕМ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

В статье приведен анализ проблем оперативного ведения режимов распределительных электрических сетей напряжением 6-110 (150) кВ. Показана экономическая целесообразность и техническая возможность обеспечения надёжности и непрерывности энергоснабжения в случае размыкания контуров электрических сетей напряжением 110 (150) кВ. Обоснована актуальность проблемы размыкания контуров в современных неоднородных электрических сетях, находящихся в ведении операторов электрических сетей различного иерархического уровня. Показаны возможности та перспективы формирования децентрализованной мультиагентной системы управления конфигурацией распределительных электрических сетей в режиме реального времени. Представлены основные положения разработанного математического аппарата поддержки решений локальной системы управления оптимальным размыканием распределительных электрических сетей, позволяющих адаптировать конфигурацию сети в соответствии с текущими условиями режима электрической системы. На примере моделирования режимов электрических сетей напряжением 110-750 кВ Южной энергосистемы ОЭС Украины показано, что применение данного подхода позволит снизить потери энергии в электрической сети в течении года на 3-5 %.

Ключевые слова: неоднородная электрическая сеть, распределительная электрическая сеть, оптимальное управление, мультиагентная система управления, принятие решений в режиме реального времени

Надійшла 28.04.2019

Received 28.04.2019

ЗАСТОСУВАННЯ АВТОМАТИЧНОГО ШУНТУВАННЯ ФАЗ ДЛЯ ПОДАВЛЕННЯ ПОВТОРНОЇ ДУГИ В ПАУЗІ ОАПВ ЛІНІЯХ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАВАННЯ НАДВИСОКОЇ НАПРУГИ

З метою збільшення надійності та ефективності роботи ліній електропередач надвисокої напруги застосовується однофазне автоматичне повторне включення при виникненні однофазного короткого замикання. Під час циклу спрацювання однофазного автоматичного повторного включення виникає повторна дуга, яка отримує підживлення від ємнісних зв'язків невідключених фаз лінії. В свою чергу, успішність спрацювання циклу однофазного повторного включення залежить від характеристик повторної дуги. Метою статті є розробка та застосування дієвого заходу подавлення повторної дуги у вигляді автоматичного шунтування відключеної фази. Для реалізації поставленої мети розроблено підхід визначення характеристик повторної дуги струму відключеної фази, що ґрунтується на матричному методі аналізу елементів лінії електропередач. Для оцінювання ступеня впливу автоматичного шунтування фази на аперіодичну складову струму дуги підживлення була зіставлена заступна схема відключеної пошкодженої фази. На основі розроблених підходів було доведено ефективність застосування автоматичного шунтування фази для підвищення ефективності експлуатації ліній електропередачі надвисокої напруги в неповнофазних режимах роботи.

Ключові слова: однофазне автоматичне повторне включення, автоматичне шунтування фаз, повторна дуга струму, шунтувальний реактор, компенсаційний реактор.

Вступ. Для успішного гасіння дуги підживлення в лініях електропередачі надвисокої напруги 750 кВ необхідне подавлення двох складових: електромагнітної та електростатичної. Електростатична складова дуги підживлення може бути потенційно знівельована компенсаційним реактором, який компенсує електростатичний зв'язок між відключеною фазою та фазами, які залишились в роботі. Застосування компенсаційного реактору є традиційним заходом подавлення дуги підживлення, що потребує розрахунків та підбору значень опору для конкретної ЛЕП НВН.

Для подавлення обох складових дуги підживлення розглядається в роботі автоматичне шунтування (АШФ) пошкодженої фази. Автоматичне шунтування фази в паузі однофазного автоматичного повторного включення (ОАПВ) є заходом, що потребує застосування швидкодіючих вимикачів. Такий фактор обмежував застосування АШФ до теперішнього часу [2,6-8] в магістральних електричних мережах (МЕМ) через час виконання комутації повітряних вимикачів.

На сьогодні на підстанціях 750 кВ відбулась заміна повітряних вимикачів на елегазові [7]. Елегазові вимикачі в порівнянні з повітряними мають більшу швидкодію, що дозволить виконати АШФ з метою подавлення дуги підживлення змінного струму в паузі ОАПВ при виникненні однофазного дугового короткого замикання.

Тому проведення досліджень спрямованих на оцінювання впливу АШФ для успішного подавлення дуги підживлення в циклі спрацювання ОАПВ в сучасних умовах експлуатації МЕМ з встановленими елегазовими вимикачами є актуальною проблемою.

Метою статті є аналіз ефективності застосування автоматичного шунтування фаз для подавлення дуги підживлення в паузі ОАПВ.

Запропонований підхід до вирішення проблеми. Як показали дослідження, що наведені у [1,2,5-7], існують випадки коли КР не може подавити дугу підживлення в паузі ОАПВ. Дуга підживлення має дві складові:

$$I_{\text{дуги}} = I_{\text{дуги}}^C + I_{\text{дуги}}^L \quad (1)$$

Для гасіння вторинної дуги струму встановлюється КР з певним значенням опору, по методиці, що наведена в [8]. Ємнісний струм для ЛЕП НВН у випадку ідеальної схеми транспозиції проводів [1] визначається наступним виразом:

$$\begin{bmatrix} I_{Aa} \\ I_{Ab} \\ I_{Ac} \end{bmatrix} = j\omega l \begin{bmatrix} 0 & C_M & C_M \\ C_M & 0 & C_M \\ C_M & C_M & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} \quad (2)$$

В роботі розглядається випадок, коли на фазі А відбулось КЗ, та, відповідно, вимикачі пошкодженої фази знаходяться у відімкненому стані. Використовуючи вираз (1), ми можемо розрахувати емнісний струм фази А, який отримує підживлення від двох непошкоджених фаз:

$$I_{Ac} = j\omega |C_M| (V_B + V_C) \quad (3)$$

З виразу (2) видно, що значення струму залежить від міжфазної ємності C_M . Слід зазначити, що ЛЕП НВН мають велике значення міжфазної ємності, та, відповідно, цикл спрацювання ОАПВ не завжди буває успішним при таких умовах.

Головною метою КР є створення такого резонансного контуру, в якому міжфазний індуктивний струм, що генерується шунтувальними реакторами (ШР) з встановленим КР повинен мати таке саме значення, як і струм, що спричинений міжфазними ємностями. В такому випадку еквівалентний струм реактора:

$$\begin{bmatrix} I_{A1} \\ I_{B1} \\ I_{C1} \end{bmatrix} = -j \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{I0}^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & X_{II}^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & X_{I2}^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} \quad (4)$$

де $X_{II}^{-1} = X_{I2}^{-1}$ провідність шунтувального реактора прямої послідовності, $X_{I0}^{-1} = (X_{II} + 3X_n)^{-1}$ провідність шунтувального реактора (ШР) нульової послідовності.

Вирішуючи (2), ми отримуємо фазні індуктивні струми

$$\begin{bmatrix} I_{AL} \\ I_{BL} \\ I_{CL} \end{bmatrix} = -j \begin{bmatrix} \alpha_s & \beta_m & \beta_m \\ \beta_m & \alpha_s & \beta_m \\ \beta_m & \beta_m & \alpha_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} \quad (5)$$

де $\alpha_s = (X_{I0}^{-1} + 2X_{II}^{-1})/3$ діагональні елементи матриці ШР; $\beta_m = (X_{I0}^{-1} - X_{II}^{-1})/3$ недіагональні елементи.

У випадку виникнення КЗ індуктивний струм ШР визначається:

$$I_{AL} = -j\beta_M (V_B + V_C) \quad (6)$$

Для того, щоб сума векторів емнісних та індуктивних струмів дорівнювала нулю $\overline{I_{AC}} + \overline{I_{AL}} = 0$ для ЛЕП НВН необхідно, щоб індуктивна провідність дорівнювала емнісній міжфазній провідності: $(X_{I0}^{-1} - X_{II}^{-1})/3 = \omega C_M$ у випадку встановлення КР.

Струм підживлення дуги буде дорівнювати сумі електромагнітної та емнісної складової:

$$I_{дуги} = j(V_B + V_C)(\omega |C_M| - \beta_M) \quad (7)$$

У той же час в процесі динамічного переходу режиму ЛЕП НВН в цикл спрацювання ОАПВ відбувається збільшення кута між ЕРС прилеглих систем, і, відповідно в струмі дуги підживлення визначальною стає електромагнітна складова. При кутах між ЕРС прилеглих систем в діапазоні $\delta_0 \div \delta_0 + 40^\circ$ (δ_0 - кут між ЕРС в нормальному режимі), повний струм підживлення досягає значень 70-90 А. Згідно дослідним даним [2] при таких струмах підживлення тривалість паузи ОАПВ повинна становити 1,8-3,0 с, а при струмах, що перевищують 90 А, успішне гасіння дуги стає малоімовірним.

При однофазному дуговому короткому замиканні в ЛЕП НВН вимикачі відключають струм короткого замикання з обох сторін пошкодженої фази. Після відключення струму короткого замикання вторинна дуга протікає в місці короткого замикання, що спричинена електростатичною складовою від невідключених фаз. У цьому випадку, якщо взаємозв'язок між фазами великий, вторинна дуга не буде гаситися протягом циклу спрацювання ОАПВ перед повторним включенням вимикачів.

Завданням АШФ (рис.1) є зниження електростатичної, а також електромагнітної складових струму підживлення з тим, щоб забезпечити успішне ОАПВ [3,4]. В результаті роботи АШФ відбувається відключення вимикачів Q_1^{III}, Q_2^{III} при якому забезпечується гасіння повторної дуги, оскільки опір заземлюючих елегазових вимикачів менше, ніж у повторної дуги.

Використання високошвидкісних заземлюючих вимикачів (ВЗВ) забезпечує умову гасіння вторинної дуги шляхом заземлення відключеної фази з обох кінців. Після гасіння вторинної дуги після спрацювання АШФ відбувається пригасування електромагнітної та електростатичної складової повторної дуги. Після операції відключення ВЗВ та успішного гасіння дуги відбувається відключення вимикачів Q_1^{III}, Q_2^{III} та включення вимикачів Q_A пошкодженої фази А фази.

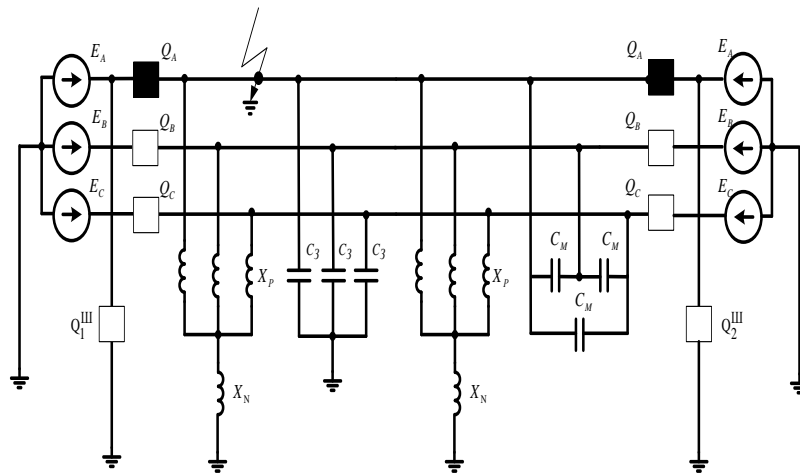


Рисунок 1 – Автоматичне шунтування фази в паузі ОАПВ

У роботі розглядається випадок неправильного вибору опору КР, який призводить до неуспішного циклу спрацювання ОАПВ внаслідок негасіння повторної дуги (Рис.2-4). На рис. 2 наведено струм дуги при дуговому короткому замиканні. На рис. 2 момент спрацювання ОАПВ відбувається в момент часу 0,075.

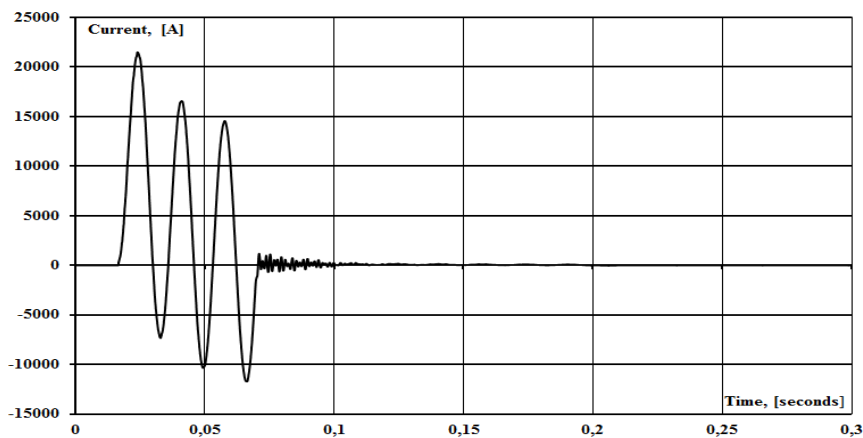


Рисунок 2 – Струм дуги при дуговому КЗ на ЛЕП НВН

Після того, як спрацює ОАПВ, струм повторної дуги буде отримувати підживлення від невідключених фаз, що наведена на рис.3. Значення струму повторної дуги перевищує гранично допустиме та призводить до неефективності застосування циклу спрацювання ОАПВ.

Опір повторної дуги в паузі ОАПВ наведено на рис.4 та описується наступним виразом:

$$R_{\text{дуги}} = R_0 e^{-kI_{\text{дуги}}} \quad (8)$$

Заступна схема заміщення під час здійснення ОАПВ наведена на рис. 5. На рис.5 $2C_M$ - міжфазна ємність невідключених фаз, C_E - ємність між фазою та землею відключеної фази. L_{SR} - індуктивність ШР, L_{CR} - індуктивність КР, R_{Σ} - сумарний активний опір відключеної фази.

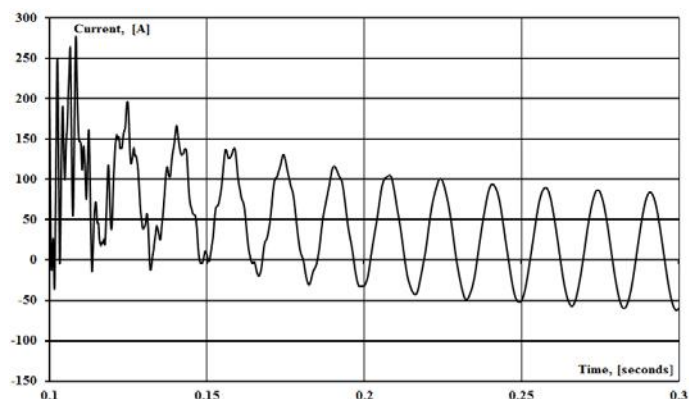


Рисунок 3 – Ефективність застосування АШФ для запобігання аномальних резонансних перенапруг

де $I_{\text{дуги}}$ діюче значення струму дуги (А), R_0, k параметри дуги.

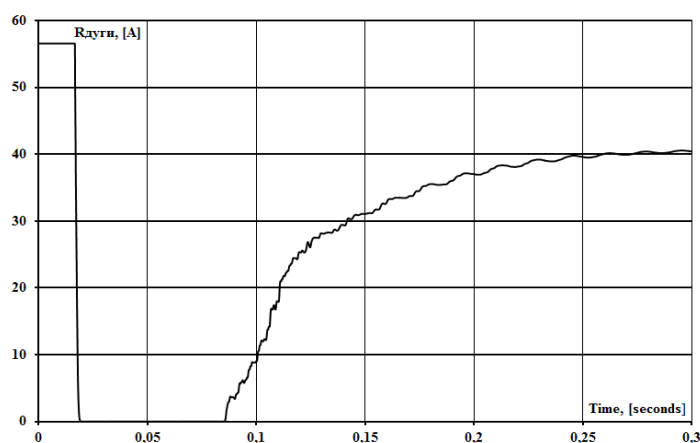


Рисунок 4 – Опір дуги при дуговому КЗ при невдалому циклі ОАПВ

Після вирішення диференційних рівнянь [8] отримаємо вираз для миттєвого значення повторної дуги при здійсненні ОАПВ:

$$i_{\text{дуги}}(t) = \frac{U_{\text{дуги}}}{Z_{\text{дуги}}} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_{\kappa}) + i_{\text{дуги}}(0) e^{-t/T} \quad (9)$$

де $U_{\text{дуги}}$ - напруга дуги; $R_{\text{дуги}}$ – опір дуги, ω – кутова швидкість; T – постійна часу затухання схеми (рис.5), $i_{\text{дуги}}(0)$ – початкове значення струму дуги; α – кут між горизонталлю та вектором напруги $U_{\text{дуги}}$; φ_{κ} – аргумент опору дуги.

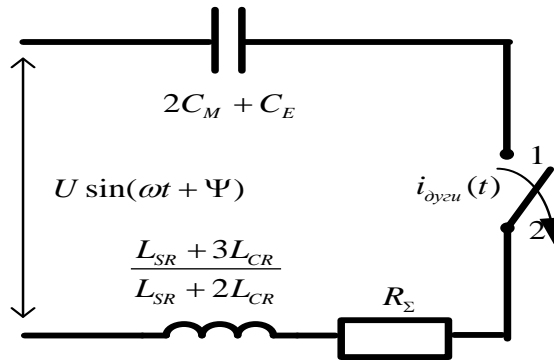


Рисунок 5 – Заступна схема заміщення відключеної фази при ОАПВ

При застосуванні АШФ виконується закорочування фази, при якому постійна часу стає рівною нулю $T = 0$. Підставляючи в аперіодичну складову дуги струму (5) $T = 0$ отримаємо $e^{-t/0} = e^{-\infty} = 0$. Тим самим аперіодична складова дуги струму, яка перешкоджає затуханню (6) стає рівною нулю. На рис. 6 та 7 наведено струм та опір дуги підживлення при здійсненні АШФ в момент часу 0.2. Як видно з рис. 6 та 7 при АШФ повторна дуга ефективно гаситься.

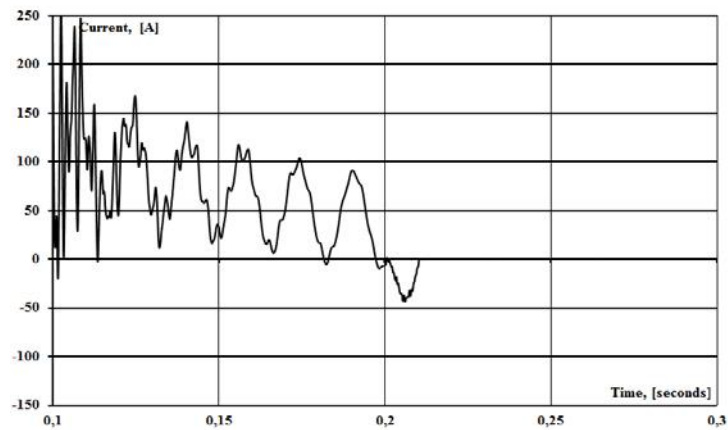


Рисунок 6 – Ефективність застосування АШФ для запобігання тривалому існуванню повторної дуги

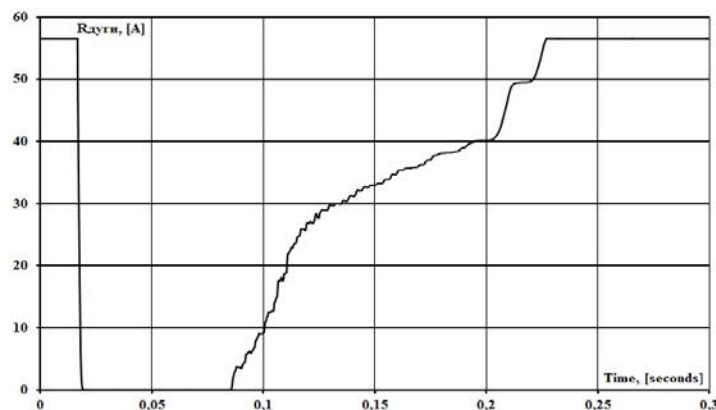


Рисунок 7 – Ефективність застосування АШФ для запобігання тривалого існування дуги підживлення зі значеннями, що перевищують гранично допустимі

При однофазному короткому замиканні в лініях надвисокої напруги після відключення фази з обох сторін вимикачами вторинна дуга, яка спричинена електростатичною та електромагнітною складовою невідключених фаз, може тривалий час існувати на місці короткого замикання.

Одним з можливих способів усунення вторинної дуги є використання автоматичного шунтування фаз, яке здатне під час здійснення циклу ОАПВ виконати подавлення аперіодичної та синусоїдальної компоненти повторної дуги струму.

Список використаної літератури

1. Т. Н. Krasyl'nykova Comparative Analysis of Ways of Transient Single Line to Ground Fault Removal on EHV and UHV Transmission Untransposed Lines / T. H. Krasyl'nykova, S. H. Dzhononaeв // *Elektrychestvo*. - 2017. - № 11. - P. 22-29

2. Y Tugay.. The resonance overvoltages in EHV network. Proceedings of IEEE Sponsored Conference EPQU'09 – International Conference on Electrical Power Quality and Utilization, Poland, Lodz, September 15-17, 2009 – pp. 14–18.

3. R.M., Hasibar Legate A.C., Brunke J., Peterson W.G. - The Application of High-Speed Grounding Switches for Single-Pole Reclosing on 500 kV Power Systems IEEE Transactions on Power Apparatus and System, Vol.PAS-100, No.4, April 1981. - P.1512-1515.

4. C. H. Kim and S. P. Ahn, “The simulation of high speed grounding switches for the rapid secondary arc extinction on 765 kV transmission lines,” in Proc. of the Int’l Conf. on Power Systems Transients, Hungary, pp. 173–178, June 1999.

5. I. M. Dudurych, T.J. Gallagher, E. Rosolowski, “Arc Effect on Single-Phase Reclosing Time of a UHV Power Transmission Line”, IEEE Trans. Power Delivery, vol 19, no. 2, pp. 854-860, April 2004.

6. V. Kuznetsov, Y. Tugay, V. Kuchansky Investigation of transposition EHV transmission lines on abnormal overvoltages. Technical electrodynamic, 2013, Vol.6, pp.51–56.

7. V. Kuznetsov, Y. Tugay, V. Kuchansky Influence of corona discharge on the internal overvoltages in highway electrical networks. Technical electrodynamic, 2017, Vol.6, pp.55–60.

8. V.V. Kuchansky Application of Controlled Shunt Reactors for Suppression Abnormal Resonance Overvoltages in Assymetric Modes // 2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)– p.122-125.

References

1. T. H Krasyl'nykova.Comparative Analysis of Ways of Transient Single Line to Ground Fault Removal on EHV and UHV Transmission Untransposed Lines / T. H. Krasyl'nykova, S. H. Dzhononaeв // *Elektrychestvo*. - 2017. - № 11. - P. 22-29

2. Y. Tugay. The resonance overvoltages in EHV network. Proceedings of IEEE Sponsored Conference EPQU'09 – International Conference on Electrical Power Quality and Utilization, Poland, Lodz, September 15-17, 2009 – pp. 14–18.

3. R.M., Hasibar Legate A.C., Brunke J., Peterson W.G. - The Application of High-Speed Grounding Switches for Single-Pole Reclosing on 500 kV Power Systems IEEE Transactions on Power Apparatus and System, Vol.PAS-100, No.4, April 1981. - P.1512-1515.

4. C. H. Kim and S. P. Ahn, “The simulation of high speed grounding switches for the rapid secondary arc extinction on 765 kV transmission lines,” in Proc. of the Int’l Conf. on Power Systems Transients, Hungary, pp. 173–178, June 1999.

5. I. M. Dudurych, T.J. Gallagher, E. Rosolowski, “Arc Effect on Single-Phase Reclosing Time of a UHV Power Transmission Line”, IEEE Trans. Power Delivery, vol 19, no. 2, pp. 854-860, April 2004.

6. V. Kuznetsov, Y. Tugay, V. Kuchansky Investigation of transposition EHV transmission lines on abnormal overvoltages. Technical electrodynamic, 2013, Vol.6, pp.51–56.

7. V. Kuznetsov, Y. Tugay, V. Kuchansky Influence of corona discharge on the internal overvoltages in highway electrical networks. Technical electrodynamic, 2017, Vol.6, pp.55–60.

8. V.V Kuchansky. Application of Controlled Shunt Reactors for Suppression Abnormal Resonance Overvoltages in Assymetric Modes // 2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)– p.122-125.

УДК 621.315.1

В. В. Кучанский, с.н.с., к.т.н., ORCID 0000-0002-8648-7942
Институт электродинамики НАН Украины

ПРИМЕНЕНИЕ АВТОМАТИЧЕСКОГО ШУНТИРОВАНИЯ ФАЗ ДЛЯ ПОДАВЛЕНИЯ ПОВТОРНОЙ ДУГИ В ПАУЗАХ ОАПВ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ СВЕРХВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

С целью увеличения надежности и эффективности работы линий электропередач сверхвысокого напряжения применяется однофазное автоматическое повторное включение при возникновении однофазного короткого замыкания. Во время цикла срабатывания однофазного автоматического повторного включения возникает повторная дуга, которая получает подпитку от емкостных связей неотключенных фаз линии. В свою очередь, успешность срабатывания цикла однофазного повторного включения зависит от характеристик повторной дуги. Целью статьи является разработка и применение эффективного мероприятия подавления повторной дуги в виде автоматического шунтирования отключенной фазы. Для реализации поставленной цели разработан подход определения характеристик повторной дуги тока отключенной фазы, основанный на матричном методе анализа элементов линии электропередач. Для оценки степени влияния автоматического шунтирования фазы на апериодическую составляющую тока дуги подпитки была сопоставлена схема замещения отключенной поврежденной фазы. На основе разработанных подходов была доказана эффективность применения автоматического шунтирования фазы для повышения эффективности эксплуатации линий электропередачи сверхвысокого напряжения в неполнофазных режимах работы.

Ключевые слова: однофазное автоматическое повторное включение, автоматическое шунтирование фаз, повторная дуга, шунтирующий реактор, компенсационный реактор.

V. Kuchansky, SRF., Cand. Sc. (Eng.) ORCID 0000-0002-8648-7942
Institute of Electrodynamics NAS of Ukraine

APPLICATION OF AUTOMATIC PHASE SHUNTING FOR SUPPRESSION OF THE SECONDARY ARC IN PAUSE PAIRS OF EXTRA HIGH VOLTAGE TRANSMISSION LINES

One of the main causes of equipment failure in the main electrical network is a overvoltage, that is, increase the value of the operating voltage above the maximum value according to the technical requirements. This is because the relatively small insulation reserve provides for the components of the electricity grid because of its high cost for a given voltage. Generally, cost of power systems insulation is a significant factor in capital expenditures. Internal overvoltage appears through resonance, due to coincidence of the parameters of the circle. In order to increase the reliability and efficiency of extra-high voltage power lines, a single-phase automatic reclose is applied when a single-phase short circuit occurs. During the operation cycle of a single-phase automatic reclose, a secondary arc arises, which receives supplying from the capacitive connections of the unconnected phases of the line. In turn, the success of a single-phase reclosing cycle depends on the characteristics of the secondary arc. The aim of the article is the development and application of an effective measure of suppressing a secondary arc in the form of automatic shunting of the disconnected phase. To achieve this goal, an approach has been developed to determine the characteristics of the repeated arc of the current of the disconnected phase, based on the matrix method of analysis of power line elements. To assess the degree of influence of automatic phase shunting on the aperiodic component of the charge arc current, the equivalent circuit of the disconnected damaged phase was compared. Based on the developed approaches, the effectiveness of the use of automatic phase shunting to increase the efficiency of operation of extra-high voltage power lines in o-phase operation modes was proved.

Key words: single-phase automatic reclose, automatic phase shunting, secondary arc, shunt reactor, compensation reactor.

Надійшла 15.05.2019
Received 15.05.2019

ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ENERGY EFFICIENCY AND ENERGY SAVINGS

УДК 621.438

В.М. Горбов, к.т.н., проф., ORCID 0000-0002-9697-8083
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
С.М. Мовчан, нач. відділу, ORCID 0000-0002-2893-7597
Державне підприємство "Науково-виробничий комплекс газотурбобудування "Зоря"-
"Машпроект"
Д.М. Соломонюк, к.т.н., ORCID 0000-0002-3479-9397
Державне підприємство "Науково-виробничий комплекс газотурбобудування "Зоря"-
"Машпроект"

ПЕРСПЕКТИВИ МОДЕРНІЗАЦІЇ ГТС УКРАЇНИ РЕГЕНЕРАТИВНИМИ ГАЗОТУРБІННИМИ УСТАНОВКАМИ

Визначена економія паливного газу у газотурбінних приводах газоперекачувальних агрегатів газотранспортної системи України за рахунок використання ГТУ з регенерацією теплоти. Заміна в існуючих регенеративних газотурбінних установках пластинчастих регенераторів новими трубчастими теплообмінниками з підвищенням ККД до 31,2 % (замість існуючих 20–21,3 %), зменшить загальну витрату палива на привідні ГТУ на 7,4 %. Заміна застарілих ГТУ новими регенеративними установками з ККД 40,3 %, дозволить знизити загальну витрату палива на 3,0 %, при модернізації ГТУ потужністю 16 МВт, на 18,1 % – при модернізації установок потужністю 10 МВт і на 4,2 % при модернізації установок потужністю 6 МВт. Рекомендовані параметри регенераторів для модернізації існуючих ГТУ: тепла ефективність 0,82, сумарні відносні втрати тиску робочого тіла 0,035, для нових установок – 0,837 і 0,032 відповідно. За рахунок використання трубчастих поверхонь, профільованих лунками, можливо знизити масу трубчастого регенератора на 15–20 % і наблизити його показники до показників пластинчастих регенераторів.

Ключові слова: газотранспортна система, газотурбінні установки, регенерація теплоти, регенератор, коефіцієнт корисної дії, витрата палива.

Вступ

Газотранспортна система (ГТС) України – одна з найбільших у світі інфраструктур для транзиту газу і друга в Європі: пропускна здатність на вході 304,0 млрд. м³/рік, на виході – 145,8 млрд. м³/рік. На сьогодні компанія Укртрансгаз експлуатує 702 газоперекачувальні агрегати (ГПА) загальною потужністю 5440 МВт. Вони розміщені на 72 компресорних станціях, у складі яких знаходиться 108 компресорних цехів [1, 2]. Основним приводом, що використовується у ГПА, є газотурбінні установки (ГТУ) – ними обладнано 448 агрегатів (64 %), їх загальна потужність – 4535 МВт (тобто 83,4 % від потужності всіх приводних двигунів). Більша частина цих ГТУ вичерпала свій ресурс, фізично й морально застаріла. Середній їх коефіцієнт корисної дії (ККД) знаходиться на рівні 24–25 %. Річна витрата палива на ГТУ складає 8,4 млрд. м. куб на рік (9 % від загального обсягу транзиту), а витрати на паливо – 80 % від загальних експлуатаційних витрат. Таким чином, ГТС є найбільшим споживачем газоподібного палива в Україні, тому задача зменшення експлуатаційних витрат на паливо шляхом підвищення ефективності приводних двигунів є актуальною задачею [2– 5].

Поточний стан газотранспортної системи потребує вживання негайних заходів, спрямованих на підвищення її надійності й ефективності роботи. З 1992-го року у середньому модернізувалось, приблизно, чотири ГПА на рік, хоча для модернізації ГТС темпами, які б випереджали зношення обладнання, необхідно модернізувати 20 и більше агрегатів на рік [2– 4, 6].

У зв'язку з цим було розпочато масштабний проект з модернізації та реконструкції газотранспортної системи, основними задачами якого є впровадження комплексних рішень, які знижують енергозатрати з одночасним підвищенням надійності і ефективності. Кінцевою метою є збільшення комерційної привабливості транспортних маршрутів через територію України і мінімізація ризиків постачання ними природного газу до Європейського Союзу [1, 2].

© В.М. Горбов, С.М. Мовчан, Д.М. Соломонюк, 2019

В останні десятиріччя були запропоновані декілька шляхів модернізації ГТС, таких як, наприклад [3–7], проте всі вони з різних причин не були реалізовані. На сьогодні Укртрансгаз розробив концепцію модернізації ГТС України згідно, до якої розпочато реконструкцію компресорних станцій шляхом заміни ГПА, що відпрацювали свій моторесурс, на високоефективні двигуни потужністю 6, 10, 16 та 25 МВт з високим (36 % і більше) коефіцієнтом корисної дії [1]. Необхідно зазначити, що ККД сучасних ГТУ досягає 34–36 %, подальше його збільшення до 40 % і вище пов'язано з істотними проблемами [4–6, 8]. Це викликано тим, що на сьогодні можливості основного методу вдосконалення ГТУ шляхом підвищення початкової температури газу (t_3) майже вичерпані. Значення t_3 досягло величини 1250 °С, і подальше її збільшення вимагає впровадження нових складних систем охолодження проточної частини двигуна, що приводить до збільшення його вартості та може знизити надійність і термін експлуатації. Перспективним є другий метод: впровадження ГТУ складних циклів, у тому числі і з регенерацією теплоти, яка дозволяє досягти високих значень ККД вже при помірних значеннях t_3 (900–1100°С) [4, 6, 9].

Мета та завдання. Мета: оцінити рівень економії паливного газу у газотурбінних приводах газоперекачувальних агрегатів ГТС України за рахунок використання ГТУ з регенерацією теплоти.

Досягнення вказаної мети обумовлено рішенням наступних задач:

1. Проаналізувати склад газотурбінних ГПА, що експлуатуються у ГТС України, визначити перспективні напрямки модернізації.
2. Визначити економію паливного газу за рахунок модернізації регенеративних ГТУ промислового типу шляхом заміни регенераторів.
3. Визначити параметри регенераторів, призначених для модернізації існуючих регенеративних ГТУ промислового типу, їх вплив на економію паливного газу та масові показники установок.
4. Визначити зміну витрати палива, обумовлену заміною газотурбінних приводів ГПА новими регенеративними ГТУ.

Матеріал і результати досліджень

Із аналізу парку газотурбінних установок ГТС України (таблиця 1) виходить, що найбільшою групою за кількістю (45,3 % від загальної кількості агрегатів), потужністю (45,5 % від загальної потужності) і рівню споживання палива (46,0 % від загальної витрати) є газотурбінні установки агрегатною потужністю 10–10,3 МВт. Їх середній ККД складає 27,5 %, і, таким чином, ця група є найбільш перспективною для модернізації.

Таблиця 1 – Загальні характеристики ГПА з газотурбінним приводом, що встановлені у ГТС України [7, 8, 11, 13, 14]

| Назва ГПА | Номінальна потужність у станційних умовах, МВт | Витрата паливного газу нм ³ /год | ККД, % | Кількість ГПА | Сумарна потужність ГПА, МВт | Сумарна витрата паливного газу тис. нм ³ /год |
|---------------------------|--|---|--------|---------------|-----------------------------|--|
| Центавр (С-304) | 2,62 | 1080 | 25,0 | 3 | 7,86 | 3,2 |
| ГТ-6-750 | 6 | 2575 | 24,0 | 3 | 18 | 7,7 |
| ГТ-750-6 (регенеративний) | 6 | 2290 | 27,0 | 35 | 210 | 80,2 |
| ГПА-Ц-6,3 (НК-12СТ) | 6,3 | 2595 | 25,0 | 48 | 302,4 | 124,6 |
| ГПА-Ц-6,3-А | 6,3 | 2160 | 30,0 | 20 | 126 | 43,2 |
| ГПА-Ц-6,3-С | 6,3 | 2070 | 31,3 | 22 | 138,6 | 45,5 |
| ГТН-6 | 6,3 | 2702 | 24,0 | 44 | 277,2 | 118,9 |
| ГПА-Ц-8А | 8 | 2590 | 31,8 | 3 | 24 | 7,8 |
| ГПА-10 | 10 | 3885 | 26,5 | 8 | 80 | 31,1 |

Продовження таблиці 1

| | | | | | | |
|------------------------------|------|------|------|-----|--------|--------|
| ГПА-10-01 | 10 | 3591 | 28,7 | 35 | 350 | 125,7 |
| ГТК-10-2 (регенеративний) | 10 | 3675 | 28,0 | 16 | 160 | 58,8 |
| ГТК-10-4 (регенеративний) | 10 | 3550 | 29,0 | 43 | 430 | 152,7 |
| ГТК-10-АИ | 10 | 4790 | 21,5 | 1 | 10 | 4,8 |
| ГТК-10С | 10 | 4790 | 21,5 | 2 | 20 | 9,6 |
| ГТК-10И | 10,3 | 4095 | 25,9 | 83 | 854,9 | 339,9 |
| ГТНР-10 | 10,5 | 3380 | 32,0 | 15 | 157,5 | 50,7 |
| ГПА-Ц-16С (НК-16) | 16 | 5600 | 29,4 | 5 | 80 | 28,0 |
| ГПА-Ц-16 | 16 | 5885 | 28,0 | 16 | 256 | 94,2 |
| ГПУ-16 | 16 | 5490 | 30,0 | 8 | 128 | 43,9 |
| ГПУ-16 К "Водолій" | 16 | 3895 | 42,3 | 1 | 16 | 3,9 |
| ГТН-16 | 16 | 5750 | 28,6 | 4 | 64 | 23,0 |
| ГПА-25С | 25 | 7440 | 34,6 | 12 | 300 | 89,3 |
| ГТК-25И | 25 | 9192 | 28,0 | 21 | 525 | 193,0 |
| Всього | – | – | – | 448 | 4535,5 | 1679,5 |

Наступними за рівнем споживання палива є:

- ГТУ агрегатною потужністю 6 МВт (24,6 % від загальної витрати палива, середній ККД 26,3 %);
- ГТУ агрегатною потужністю 25 МВт (16,8 % від загальної витрати палива, середній ККД 30,1 %);
- ГТУ агрегатною потужністю 16 МВт (11,5 % від загальної витрати палива, середній ККД 29,0 %);

Слід зазначити, що на 94 ГПА, що експлуатуються у ГТС України, встановлені регенеративні газотурбінні установки промислового типу (ГТ-750-6 і ГТК-10), загальною потужністю 800 МВт (17,6 % від загальної потужності всіх ГТУ). Проектний ККД цих установок складає 27–29 %, в результаті чого на них приходиться 17,4 % палива, що споживають всі ГТУ. В процесі експлуатації теплообмінна матриця цих регенераторів втрачала герметичність внаслідок термоциклічних навантажень і великих перепадів температур у теплообмінних пластинах. З'являлись протікання повітря, які приблизно через 40 тис. годин напрацювання перевищували 10 % від загальної витрати [10, 12, 15, 16, 17]. Потужність ГТУ при цьому знижувалась на 30–50 %, ККД – до 20–21 % [17]. Повністю усунути протікання шляхом заварювання тріщин не вдалось: через 1000–1500 годин втрали робочого тіла повертались на попередній рівень [10, 12]. Виходячи з цього, при подальшій експлуатації регенератори виключались з роботи байпасуванням по повітрю і згодом демонтувались.

Величину збільшення витрати палива у регенеративних ГТУ внаслідок виведення регенератора з експлуатації можна оцінити за допомогою залежності, яка виражає ККД регенеративної ГТУ (η) через ККД ГТУ без регенерації (η') і безрозмірний комплекс, до якого входять параметри регенератора [18]. Для ГТУ з простою регенерацією вказана залежність матиме вид:

$$\eta = C_{\eta} \eta' = \frac{1 - C_P \cdot \delta P_{P\Sigma}}{1 - C_t \cdot C_Q \cdot \varepsilon} \eta', \quad (1)$$

де ε – теплова ефективність регенератора, яка є відношенням теплового потоку в регенераторі (Q_P) до максимального теплового потоку, що можна передати від гарячого теплоносія до холодного (Q_{\max}); $\delta P_{P\Sigma}$ –

сумарні відносні втрати тиску, $\delta P_{P\Sigma} = \delta P_{P_x} + \delta P_{P_r}$; ΔP_{P_r} і ΔP_{P_x} та $\delta P_{P_x} = \Delta P_{P_r} / P_{Г\text{ вх}}$ і $\delta P_{P_x} = \Delta P_{P_x} / P_{Г\text{ вх}}$ – абсолютні і відносні втрати тиску гарячого і холодного теплоносіїв у регенераторі; $P_{Г\text{ вх.}}$, $P_{Г\text{ вх.}}$, Па – тиск холодного і гарячого теплоносіїв на вході до регенератора, $Q_{\text{max}} = W_{P\text{ min}}(t_4 - t_2)$, Вт – максимальний тепловий потік; $W_{P\text{ min}}$ і $W_{P\text{ max}}$, Вт/К – найменший і найбільший з водяних еквівалентів холодного ($W_x = G_x \cdot c_{p_x}$) і гарячого ($W_r = G_r \cdot c_{p_r}$) теплоносіїв; t_4, t_2 , °С – температура газів та повітря перед регенератором.

Величини, що розраховуються за параметрами ГТУ без регенерації теплоти:

$$C_Q = Q_{\text{max}} / Q'_{\text{КЗ}} \quad (2)$$

– показує, яка максимальна частина теплоти, що підводиться у камері згоряння (КЗ), може бути передана у регенераторі при повній регенерації теплоти ($\varepsilon = 1$);

$$C_t = \left[1 - \left((L_0 + 1) \cdot c_{p\text{пз } 0-3} - L_0 \cdot c_{p\text{п } 0-3} \right) \cdot t_3 / Q_p^H \right]^{-1} \quad (3)$$

– враховує вплив на ККД зміни витрати робочого тіла, що виходить із КЗ; $C_p = m_{T3} \cdot C_v$ – показує, на скільки зменшиться потужність ГТУ при збільшенні сумарних втрат тиску у регенераторі на 1 %;

$$C_v = 1 / \left(\pi'_{T2}^{-m_{T2}} - 1 \right) \cdot N'_{T2} / N'_e \quad (4)$$

– характеризує вплив втрат тиску на потужність ГТУ.

Величини, що входять до вказаних залежностей: N'_{T2} , Вт – потужність процесу розширення між камерою згоряння та регенератором (зі ступенем зниження тиску π_{T2}), $m = R/c_p$; R , Дж / (кг К) – газова стала робочого тіла; $Q'_{\text{КЗ}} = G'_{\text{пал}} \cdot \eta_{\text{КЗ}} \cdot Q^H_p$, Вт – кількість теплоти, що підводиться за 1 с до робочого тіла у камерах згоряння ГТУ без регенерації; Q^H_p , Дж/кг – нижча робоча теплота згоряння палива, $c_{p\text{ } t_1-t_2}$, Дж/кг – питома середня масова ізобарна теплоємність робочого тіла у діапазоні температур t_1 і t_2 ; L_0 , кг/кг – теоретично необхідна кількість окислювача для спалення 1 кг палива; $G_{\text{пал}}$, кг/с – витрата палива; $\eta_{\text{КЗ}}$ – ККД камери згоряння; t_3 , °С – початкова температура газу у процесі розширення. Параметри зі штрихом відносяться до безрегенеративного циклу.

Розрахунок показав, що виключення регенератора із складу установки призводить до зменшення ККД у 1,36 разу (з 27–29 % до 20–21,3 %), внаслідок чого сумарна витрата палива на ГПА з газотурбінним провідом зростає на 6,3 %. Якщо прийняти, що ГПА працюють при повному завантаженні, а витрати палива на інші привідні ГТУ залишилися незмінними, то за рік це приведе до втрат у 842 млн. нм^3 . При цьому частка палива, що споживається регенеративними ГТУ, зростає до 22,2 % від загального споживання палива.

У [10] було показано, що заміна всіх застарілих ГПА агрегатами нового покоління вимагає великих фінансових вкладень, в той же час вартість модернізації існуючих ГПА у 5–8 разів менша. Цим шляхом вже пішли у Російській Федерації, де проблема модернізації ГТС є такою ж гострою, як і в Україні. Зпочатку XXI сторіччя на компресорних станціях Росії почалася модернізація старих газоперекачувальних агрегатів типу ГТК-10-4 виробництва Невського заводу (НЗЛ). Конструктивні рішення, що були прийняті при їх модернізації, дозволили за рахунок заміни окремих вузлів поліпшити характеристики цих ГПА і подовжити їх ресурс на 150–180 тис. годин [10, 12]. Пластинчасті регенератори були замінені на більш надійні трубчасті теплообмінники, основні параметри яких приведені у таблиці 2 [10, 12, 15– 17], яка містить також значення ККД і витрати палива на установку ГТК-10, що очікуються після встановлення нових регенераторів (розраховані за залежністю (1)).

Таблиця 2 – Проектні параметри регенераторів для установки ГТК-10 і очікувана паливна економічність установок після модернізації

| Регенератор, фірма-проектант | Тип поверхні теплообміну | ε | $\delta P_{P\Sigma}$ | Маса регенератора, т | ККД ГТУ, % | Витрата палива на ГТУ, $\text{нм}^3/\text{год}$ |
|----------------------------------|--------------------------|---------------|----------------------|----------------------|------------|---|
| Базовий, НЗЛ | пластинчаста | 0,7 | 0,05 | 38,7 | 28,0 | 3645 |
| Модернізований, НЗЛ | пластинчаста | 0,7 | 0,0642 | 32,1 | 27,4 | 3725 |
| Моноблоковий, ВНВО «Союзпромгаз» | орєбрєні труби | 0,7 | 0,053 | 67 | 27,9 | 3658 |

Продовження таблиці 2

| | | | | | | |
|-------------------------------|---------------------------|------|--------|------|------|------|
| Секційний, ВНВО «Союзпромгаз» | орєбрєні труби | 0,7 | 0,057 | 70,1 | 27,7 | 3685 |
| ВПТ-1400, ЗАО «ОРМА» | гладкі труби | 0,72 | 0,042 | 54 | 28,8 | 3544 |
| РВП-ТАРК-10-1, НПП ТАРК | гладкі труби | 0,8 | 0,049 | 61,2 | 30,3 | 3369 |
| РГ-10, НВЦ «Анод» | гладкі спіральні труби | 0,77 | 0,053 | 58 | 29,5 | 3460 |
| РГ-10БМ, НВЦ «Анод» | гладкі спіральні труби | 0,78 | 0,056 | 58 | 29,6 | 3448 |
| РВП-3600 -01, «ЗіО-Подольск» | гладкі труби | 0,81 | 0,0442 | 100 | 31,0 | 3293 |
| РВП-3600 -02, «ЗіО-Подольск» | гладкі труби | 0,81 | 0,0463 | 106 | 30,9 | 3303 |
| РВП-3600 -03, «ЗіО-Подольск» | гладкі труби | 0,81 | 0,05 | 96 | 30,7 | 3325 |
| РВП-3600 -04, «ЗіО-Подольск» | гладкі труби | 0,81 | 0,05 | 55,4 | 30,7 | 3325 |
| РГУ-1800, «ЗіО-Подольск» | труби з інтенсифікаторами | 0,68 | 0,0417 | 48 | 27,9 | 3658 |
| РГУ-1800-1, «ЗіО-Подольск» | труби з інтенсифікаторами | 0,73 | 0,05 | 47 | 28,7 | 3556 |
| РВП-3000БС «ЗіО-Подольск» | гладкі труби | 0,73 | 0,05 | 44 | 28,7 | 3556 |
| РВП-3000БС-01 «ЗіО-Подольск» | гладкі труби | 0,73 | 0,05 | 56 | 28,7 | 3556 |

Слід зазначити, що при виборі параметрів цих регенераторів та їх проектуванні не враховувався їх вплив на ККД ГТУ та не було проведено їх оптимізації. У [18] отримані залежності, що пов'язують параметри регенератора та його поверхні теплообміну з паливною ефективністю ГТУ і розроблені рекомендації з пошуку їх раціональних значень. Виходячи з цих рекомендацій було проведено розрахунок регенераторів ГТУ для установки ГТК-10. За основу взята конструкція трубчастого змійовикового регенератора [9], розробленого Державним підприємством «Науково виробничий комплекс газотурбобудування «Зоря»-«Машпроект» для установки ГТУ-16Р (рис. 1). Для різних значень ККД були визначені раціональні значення теплової ефективності та сумарних втрат тиску (рис. 2) і геометричні параметри регенератора (зовнішній діаметр теплообмінної труби $d_3 = 18-20$ мм, відносні кроки труб у шаховому пучку: поперечний $s_1/d_3 = 1,43-1,45$, повздовжній $s_2/d_3 = 1,1$), які забезпечують його мінімальну масу (рис. 3).

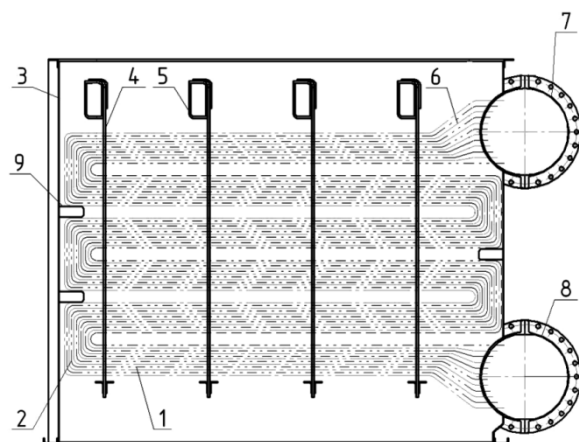


Рисунок 1 – Секція регенератора для ГТУ-16Р (ДП НВКГ «Зоря»-«Машпроект») [9]:

1 – теплообмінний пакет із плоских змійовиків; 2 – калачі; 3 – корпус; 4 – проставки; 5 – балки; 6 – відводи; 7 – роздавальний повітряний колектор; 8 – збиральний повітряний колектор; 9 – витискувач

Таким чином (рис.3), розроблені у [9] рекомендації з вибору ефективності, втрат тиску та геометричних параметрів теплообмінної матриці гладкотрубчастого регенератора дозволили при однакових значення ККД отримати регенератор для модернізації газоперекачувального агрегату ГТК-10 з масою на 10–50 % меншою маси більшості регенераторів, що запропоновані для модернізації цієї установки (рис. 3 безперервна лінія). Маса ГТУ при цьому буде меншою на 5-20 %, ніж у аналогів.

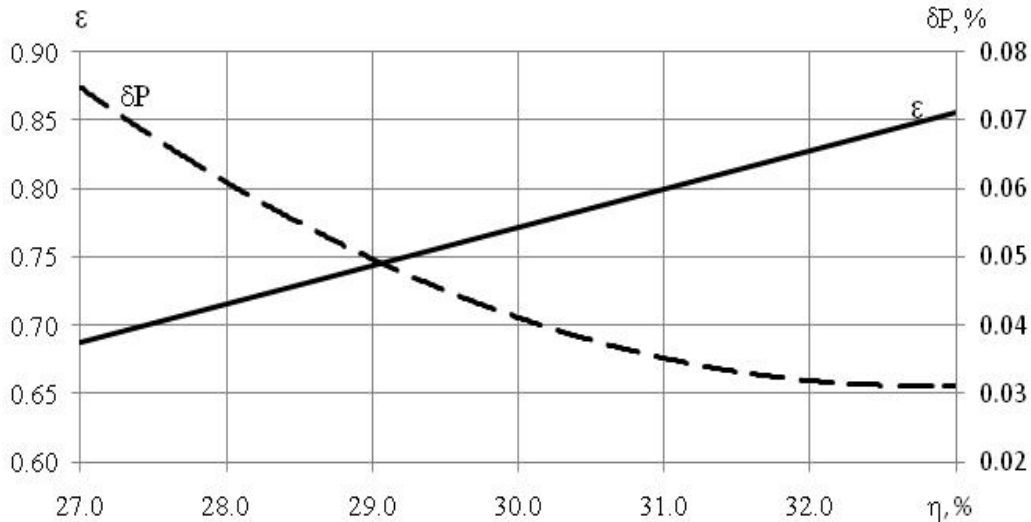


Рисунок 2 – Залежність раціональних параметрів гладкотрубчастого змійовикового регенератора для ГТК-10 від ККД установки.

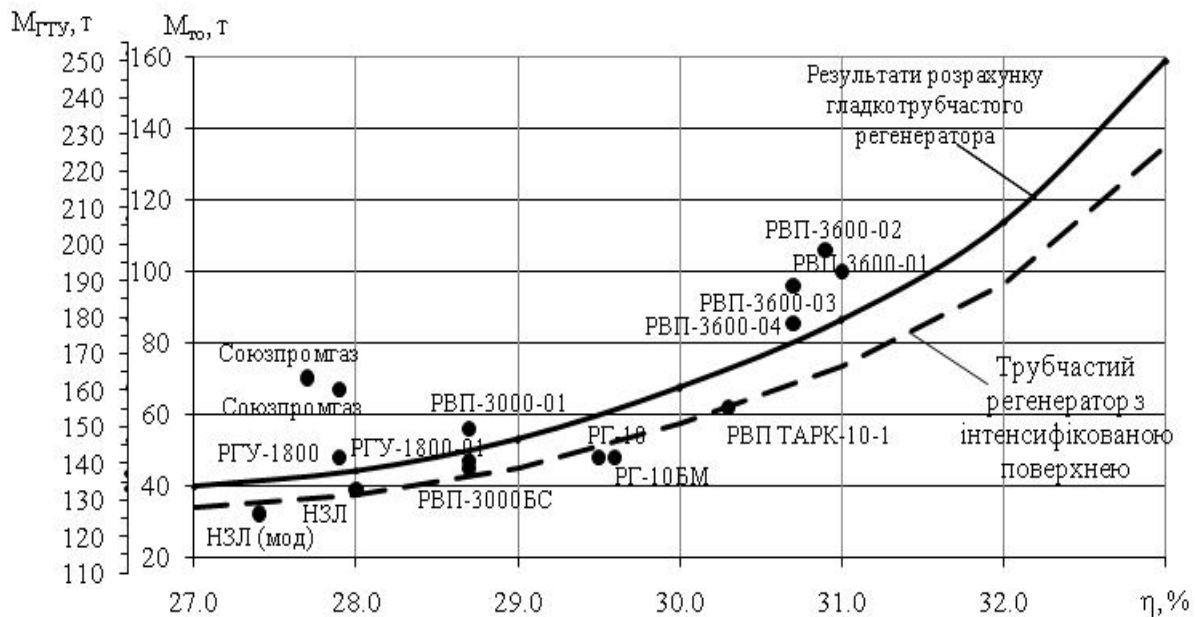


Рисунок 3 – Зміна маси регенератора для модернізації ГТК-10 і маси установки від її ККД.

Із розглянутих регенераторів (таблиця 2) при однаковому збільшенні ККД меншу масу мають (наведено на рис. 3):

- пластинчасті регенератори НЗЛ, виконані із тонких штампованих пластин товщиною 0,2 мм, матеріал нержавіюча сталь. У експлуатації продемонстрували низьку надійність, тому наразі замість них впроваджують регенератори з гладких труб;

- регенератори РГ-10 і РГ-10БМ ВАТ «Анод» з теплообмінними матрицями із спіральних змійовиків із нержавіючої сталі з малим діаметром і товщиною стінок (10×0,8 мм);

– ТАРК-10-1. На відміну від проектового регенератора він має велику (до 7,5 м) ширину, що приводить до великого кута розкриття вхідного дифузора, зростання втрат тиску і проблем при розміщенні регенератора на станції. Розрахунки змійовикового регенератора проводились з обмеженням його габаритів, що привело до збільшення його маси порівняно з регенератором ТАРК;

– регенератори РГУ-1800 та РГУ-1800-01 з теплообмінними матрицями із труб з інтенсифікацією тепловіддачі.

Використання поверхонь, інтенсифікованих лунками, [19] приведе до зниження маси теплообмінної матриці регенератора до 33 %, маси всього теплообмінника до 15–20 % (при цьому вона може стати меншою, ніж маса пластинчастого), а маса установки зменшиться на 6–14 % (рис. 3, штрихова крива).

Із рис. 3 виходить, що маса змійовикового регенератора зростає при збільшенні ККД за залежністю, близькою до експоненціальної, і вже при ККД ГТУ 30,3–31,2 % маса установки збільшиться на 25–40 % порівняно з масою ГТУ з пластинчастим регенератором НЗЛ. При цьому теплова ефективність регенератора буде 0,78–0,82; сумарні відносні втрати тиску робочого тіла 0,035–0,04 %. Якщо прийняти в якості максимально рівня ККД при встановленні нового регенератора величину 31,2 %, отримаємо витрату палива у модернізованому ГТК-10 на рівні 3300 нм³/год, а у модернізованому ГТ–750–6 на рівні 2000 нм³/год. Внаслідок цього сумарна витрата палива на ГПА з газотурбінним приводом зменшиться на 7,4 %, що за рік приведе до економії у 1 063 млн. нм³.

Наступним етапом модернізації ГТС можна вважати заміну агрегатів, що відробили свій ресурс, на агрегати нового покоління з більшою економічністю (36 % і вище). Це приводить до необхідності створення і використання для транспортування газу сучасних високоефективних ГТУ [3, 4, 6]. Так, ДП НВКГ «Зоря»-«Машпроект» було розроблено технічний проект регенеративної газотурбінної установку потужністю 16 МВт для приводу нагнітачів природного газу з ККД 40,3 % (таблиця 3) [9, 19]. При заміні нею застарілих установок потужністю 16 МВт (табл. 1) сумарна витрата палива на ГПА з газотурбінним приводом зменшиться на 3,0 %.

Таблиця 3 – Основні розрахункові параметри ГТУ для приводу нагнітача природного газу проекту ДП НПКГ «Зоря»-«Машпроект» [9, 19]

| Величина | Значення |
|--|----------|
| Потужність на вихідному валу, МВт | 16 |
| ККД ГТД, % | 40,3 |
| Ступінь підвищення тиску | 5,75 |
| Початкова температура газу, °С | 980 |
| Витрата повітря на вході до ГТД, кг/с | 74,9 |
| Теплова ефективність регенератора | 0,85 |
| Температура повітря на вході до регенератора, °С | 223 |
| Температура газів на вході до регенератора, °С | 590 |
| Сумарні відносні втрати тиску | 0,04 |
| Маса теплообмінника, т | 92,6 |

Поліпшення масогабаритних показників установки ГТУ-16Р можна виконати шляхом вибору раціональних значень ϵ і $\delta P_{p\Sigma}$, як рекомендується у [18]. Спочатку за формулою (1) визначаються значення ϵ і $\delta P_{p\Sigma}$, які забезпечують потрібне значення ККД (рис. 4), а потім за ними розраховується маса регенератора (рис. 5). Таким чином (рис. 5), для вказаного регенератора оптимальними параметрами є $\epsilon=0,837$ і $\delta P_{p\Sigma}=0,032$, які, порівняно з базовим варіантом ($\epsilon=0,85$ і $\delta P_{p\Sigma}=0,04$), забезпечать зниження маси

теплообмінника приблизно на 3 %. З іншого боку, нераціональний вибір вказаних величин міг привести до зростання маси регенератора більше, ніж на 10 %.

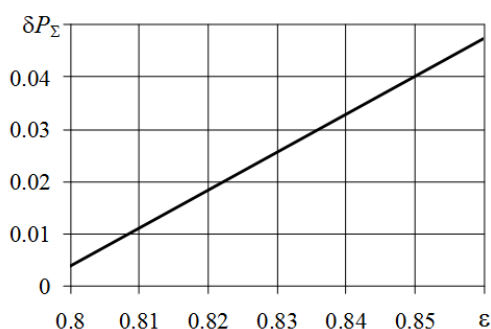


Рисунок 4 – Зв'язок між параметрами регенератора для ГТУ-16Р (ϵ і δP_{Σ}) що забезпечує задане значення ККД ГТУ

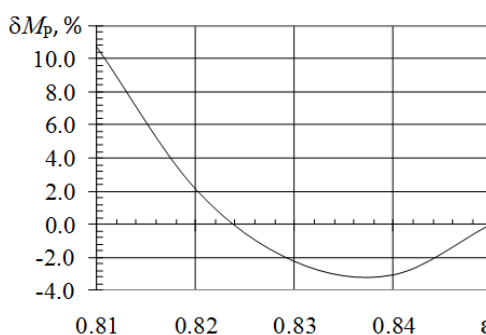


Рисунок 5 – Зміна маси регенератора для ГТУ-16Р від ϵ і δP_{Σ} при $\eta=40,3$ %

При модернізації ГТУ потужністю 10 МВт частину їх планується замінити на сучасні ГТУ рівної потужності, частину на ГТУ потужністю 16 МВт. Якщо при цьому використовувати регенеративні ГТУ з ККД на рівні 40,3 %, то економія палива складе ще 18,1 %. При заміні ГТУ потужністю 6 МВт регенеративними установками з ККД 40,3 % економія палива буде 4,2 %. Модернізація установок потужністю 25 МВт шляхом впровадження регенерації теплоти не виглядає перспективною з наступних причин. По-перше, ККД сучасних ГТУ потужністю 25 МВт вже досягло рівня 34–36 % [8]. По-друге, очікується суттєве зростання маси регенератора: у ГТУ-16Р маса регенератора досягла 92,6 т [9], а для ГТУ потужністю 25 МВт вона оцінюється на рівні 115–130 т.

Таким чином, впровадження регенеративних ГТУ на ГТС України дозволить зменшити витрату палива на привід газотурбінних ГПА від 10,4 % до 25,3 %.

Висновки

1. Модернізацію парку газотурбінних установок ГТС України доцільно проводити двома шляхами. Перший: подовження ресурсу регенеративних ГТУ промислового типу (ГТ-750-6, ГТК-10) на 50-60 тис. годин із заміною їх регенераторів. Другий: заміна застарілих ГТУ сучасними високоекономічними установками.

2. Пластинчасті регенератори, що використовувались у складі установок ГТ-750-6 і ГТК-10 продемонстрували під час експлуатації низьку надійність і були виведені із роботи. Внаслідок цього ККД вказаних ГТУ зменшився з 27–29 % до 20–21,3 %, що привело до збільшення загальної витрати палива на ГПА з газотурбінним приводом на 6,3 %.

3. Для модернізації регенеративних ГТУ доцільно використовувати більш надійні трубчасті регенератори. Рекомендуються наступні параметри трубчастого змієвикового регенератора: тепла ефективність регенератора 0,82; сумарні відносні втрати тиску робочого тіла 0,035, що дозволить отримати ККД модернізуємих ГТУ промислового типу на рівні 31,2 %, при цьому маса установки зростає на 40 % порівняно з ГТУ з базовим пластинчастим регенератором. Подальше збільшення ККД не є доцільним, оскільки приводить до різкого збільшення маси. Проведення такої модернізації дозволить зменшити витрати палива на привідні ГТУ на 7,4 %.

4. За рахунок використання трубчастих поверхонь, профільованих лунками, можливо зменшити масу регенератора на 15-20 %, при цьому її значення можуть наблизитись до показників пластинчастих регенераторів. Маса установки при цьому зменшиться на 6–14 %.

5. Використання при модернізації ГТУ потужністю 16 МВт нової регенеративної установки з ККД 40,3 % дозволить знизити витрату палива на ГТУ ГТС України на 3,0 %. Рекомендовані параметри регенератора $\varepsilon=0,837$ і $\delta P_{P\Sigma}=0,032$ забезпечать зниження маси теплообмінника на 3 % порівняно з базовою конструкцією.

6. Перспективним є використання регенеративних ГТУ при модернізації установок потужністю 10 МВт. При ККД нової установки 40,3 %, витрата палива на привідні ГТУ ГТС України знизиться на 18,1 %. Заміна існуючих ГТУ потужністю 6 МВт на регенеративні установки знизить витрату палива на 4,2 %.

7. Загальна економія палива на привід газотурбінних ГПА за рахунок використання регенеративних ГТУ може бути оцінена у діапазоні від 10,4 % до 25,3 %.

Список використаної літератури

1. Укртрансгаз. [Електронний ресурс]: Офіційний сайт АТ Укртрансгаз – Режим доступу до документу: <http://utg.ua>.

2. Михалевич О. Т. Модернізація газотранспортної системи України [Текст] // Трубопровідний транспорт – №6 (90) – 2014 – С. 12–13.

3. Халатов А. А. Вопросы реконструкции компрессорных станций газотранспортной системы Украины [Текст]/ А.А. Халатов, В.П. Парафейник, А.В. Смирнов, Д.А. Костенко // Компрессорное и энергетическое машиностроение – 2009 – № 4 (18) – 8–13 с.

4. Халатов, А. А. Какие газотурбинные двигатели необходимы газотранспортной системе Украины? [Текст]/ А. А. Халатов, Д. А. Костенко // Газотурбинные технологии. – 2008. – № 7. – С. 22–24.

5. Халатов А.А. Состояние и проблемы развития механического привода для ГТС Украины/ А.А. Халатов, А.А. Долинский, Д.А. Костенко, В.П. Парафейник // Промышленная теплотехника. – 2010. – Том. 32. – №1 – С. 44-53

6. Патон Б. Концепція (проект) державної науково-технічної програми "Створення промислових газотурбінних двигунів нового покоління для газової промисловості та енергетики" [Текст] / Б. Патон, А. Халатов, Д. Костенко, Б. Білека, Є. Письменний, А. Боцула, В. Парафійник, В. Конянін // Вісн. НАН України. – 2008. – № 4. – С. 3–9.

7. Кравченко И. Ф. Создание газотурбинного двигателя АИ-312 для модернизации ГТС Украины импортозамещающим оборудованием [Текст] / И. Ф. Кравченко, С. А. Смирнов, В. В. Кубатин // Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХП», 2016. – № 9(1181). – С. 56–64. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2016.09.08.

8. Установки для газотранспортной системы [Електронний ресурс]: Офіційний сайт ДП НВКГ «Зоря»-«Машпроект» – Режим доступу до документу : <http://zmturbines.com/ru/equipment-for-the-gas-transportation-system>

9. Спицын, В. Е. Регенеративная газотурбинная установка для ГПА мощностью 16 МВт / В. Е. Спицын, А. Л. Боцула, С. Н. Мовчан, В. Н. Чобенко, Д. Н. Соломонюк // Турбины и дизели – 2010. – № 5. – С. 28-31.

10. Сударев А. В. Рекуперативные подогреватели для ГПА компрессорных станций: опыт России [Текст] / А. В. Сударев // Промышленная теплотехника. – 2009. –Т.31. – № 4. С. 34–43.

11. Крук І. С. Експлуатаційні, технологічні та метрологічні характеристики газоперекачувальних агрегатів – база основа ефективності газотранспортної системи [Текст] / І.С. Крук, Ю.Б. Бурбела // Метрологія-2014. – 2014. – с. 433–434.

12. Виноградов В.В. Опыт внедрения трубчатых регенераторов на КС [Текст] / В.В. Виноградов, А.Н. Торбег, В.Б. Сударев, Е.П. Шевченко// Газовая промышленность. – 2002. – №11. – С. 69 – 71

13. Поршаков Б.П. Газотурбинные установки [Текст] / Б.П. Поршаков, А.А. Апостолов, В.И. Никишин. - М: ГУП Издательство «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2003. – 240 с.

14. Компрессорное оборудование и газоперекачивающие агрегаты. Технический каталог [Електронний ресурс]: Офіційний сайт ПАО "Сумское НПО" – Режим доступу до документу : <http://snpo.ua/ru/produkts/oborudovanie-tehnologicheskoe-nefteg/gazoperekachivayushhie-i-turbokompressornye-agregaty/gpa-s-gazoturbinnym-privodom-harakteristik/>

15. Теплообменники-регенераторы (воздухонагреватели) трубчатые [Електронний ресурс]: Официальный сайт ВАТ "Факел": <http://www.fakel.ua/ru/products/gts/75/83/>

16. Белоусов В.Д. Трубчатые регенераторы ОАО «ЗиО-Подольск» [Текст] / В. Д. Белоусов, В. Г. Даниленко, Н. И. Мишустин, В. П. Рыбаков // Газотурбинные технологии. – 2004. – № 5 (сентябрь). – С. 44-45.

17. Аношкин Ю. И. Результаты работы по внедрению регенератора змеевикового типа для газотурбинной установки ГТК-10 [Текст] / Ю.И.Аношкин, Т.Т. Алиев, С.Б.Походяев, А.О.Прокопец // Газотурбинные технологии. – 2006. – № 5 (сентябрь). – С. 26-28.

18. Gorbov V. Decreasing the mass indices of gas turbine engines regenerators by means of choosing rational parameters [Текст] / V. Gorbov, D. Solomonuk // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2016 – №6/8(84)– С. 12 – 23.

19. Мовчан, С. М. Перспективи використання у регенераторах ГТУ поверхонь теплообміну з інтенсифікацією теплообміну виступами та западинами / С. М. Мовчан, Д. М. Соломонюк // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 9(1231). – С.45–51. – Бібліопр. : 13 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2017.09.07.

V.Gorbov, Cand. Sc. (Eng.), Prof, **ORCID** 0000-0002-9697-8083

Admiral Makarov National University of Shipbuilding

S. Movchan, chief of department, **ORCID** 0000-0002-2893-7597

State enterprise "Zorya"-"Mashproekt" Gas Turbine Research and Development Complex"

D. Solomonuk, Cand. Sc. (Eng.) **ORCID** 0000-0002-3479-9397

State enterprise "Zorya"-"Mashproekt" Gas Turbine Research and Development Complex"

PROSPECTS OF MODERNIZATION OF THE UKRAINIAN GAS TRANSPORT SYSTEM WITH REGENERATIVE GAS TURBINE POWER PLANTS

Nearly 64% of gas compressor units (GCU) of the Ukrainian Gas Transport System (GTS) are equipped with gas turbine power plants (GTPPs), and their total capacity amounts to 83,4% of the power of all drive motors. Most of these GTPPs have already exceeded a life cycle and become out-of-date. Their average performance efficiency stands at 24-25%. The current state of the Gas Transport System demands immediate measures aimed at increasing its reliability and efficiency.

At the first stage of modernization of the gas turbine power plants park, it is reasonable to extend the life of regenerative gas turbine power plants by 50-60 thousand hours, replacing their plate regenerators with new high-efficiency and reliable tubular heat exchangers. Recommended regenerator parameters: thermal efficiency 0.82; total relative loss of working fluid pressure 0.035. This will increase the efficiency to 31.2 % (instead of the existing 20–21.3 %), resulting in decreasing of the total fuel consumption for drive gas turbine power plants by 7.4%. At the same time, the weight of the plant will increase by 40% compared to the GTPPs with a base plate regenerator, but it can be reduced by using tubular surfaces profiled with dimples (the weight of the regenerator will decrease by 15-20%, the weight of the plant – by 6-14%).

Replacement of the out-of-date GTPPs with modern high-efficiency plants is the second stage of modernization. The use of new regenerative plants with an efficiency of 40.3% will reduce the total fuel consumption on GCU by 3.0% at modernization of the 16 MW GTPPs, by 18.1 % at modernization of the 10 MW GTPPs, and by 4.2 % at modernization of the 6 MW GTPPs. Recommended regenerator parameters: thermal efficiency 0.837; total relative loss of working fluid pressure 0.032.

The total fuel economy for the gas turbine drive of the GCU due to the use of the regenerative GTPPs can be estimated within the range from 10.4 % to 25.3 %.

Key words: Ukrainian Gas Transport System, gas turbine power plants, heat regeneration, performance efficiency, total fuel consumption.

References

1. PJSC Ukrtransgaz. Official site. [Online]. Available: <http://utg.ua>. Accessed on: March 04, 2019.
2. O. T. Mykhalevych, "Modernization of the gas transport system of Ukraine", Pipeline transport, no. 6 (90), pp. 12–13, 2014.
3. A.A. Khalatov, V.P. Parafeinyk, A.V. Smyrnov, D.A. Kostenko, "Problems of reconstruction of the compressor stations of the gas transport system of Ukraine", Compressor and power machinebuilding, no. 4 (18), pp. 8–13, 2009.
4. A.A. Khalatov, D.A. Kostenko, "What gasturbine engines do need the gas transport system of Ukraine?", Gas-turbine technologies. no. 7, pp. 22–24, 2008.
5. A.A. Khalatov, A.A. Dolynskiy, D.A. Kostenko, V.P. Parafeinyk, "State and problems of development of mechanical drive for gas transport system of Ukraine ", Industrial Heat Engineering, vol. 32, no. 1, pp. 44–53, 2010.

6. B. Paton, A. Khalatov, D. Kostenko, B. Bileka, Ye. Pysmennyi, A. Botsula, V. Parafeinyk, V. Koniakhin "Conception (project) of the government scientific and technical program "Creation of industrial gasturbine engines of new generation for gas industry and energy"", Bulletin of the National Academy of Sciences of Ukraine, no 4, pp. 3–9, 2008.

7. I. Kravchenko, S. Smirnov, V. Kubatin, "Development of the AI-312 gas turbine engine for the modernization of the Ukrainian gas transport system with import-substituting equipment", Bulletin of NTU "KhPI" Series: Power and heat engineering processes and equipment, no. 9(1181), pp. 56–64, 2016, ISSN 2078-774X, doi: 10.20998/2078-774X.2016.09.08.

8. Units for gas pipeline system. Zorya-Mashproekt Gas Turbine Research and Development Complex. Official site. [Online]. Available: <http://zmturbines.com/ru/equipment-for-the-gas-transportation-system>. Accessed on: March 04, 2019.

9. V. Ye. Spitsyn, A.L. Botsula, S. N. Movchan, V. N. Chobenko, D. N. Solomoniuk "Regenerative gas turbine plant for gas pumping unit rated at 16 MW". Turbines & Diesels Magazine, no.5, pp. 28-31, 2010.

10. A. V. Sudarev. "Recuperative heaters for gascompressor units of the compressor stations: experience of Russia", Industrial Heat Engineering, vol. 31, no. 4, pp. 34–43, 2009.

11. I.S. Kruk, Yu.B. Burbela "Operating, technological and metrology characteristics of gascompressor units are basic foundation of efficiency of the gas transport system" Metrology-2014. – 2014. – с. 433–434.

12. V.V. Vinogradov, A. N. Torbeh, V. B. Sudarev, E. P. Shevchenko "Experience of instalation of tubular regenerators on compressor stations", Gas industries, no. 11, pp. 69 – 71, 2002.

13. B.P. Porshakov, A.A. Apostolov, V.I. Nikishyn. Gasturbine plants, Moscow, Russian: Publishing house «Oil and gas» of Russian state oil and gas university by name I.M. Hubkin, 2003/

14. Compressor equipment and gascompressor units. Technical catalogue. "Sumy NPO". Official site. [Online]. Available: <http://snpo.ua/ru/produkts/oborudovanie-tehnologicheskoe-nefteg/gazoperekachivayushhie-i-turbokompressornye-agregaty/gpa-s-gazoturbinnym-privodom-harakteristiki/> Accessed on: March 04, 2019.

15. Pipe heat exchangers – regenerators (Air Heaters). PJSTC "Fakel". Official site. [Online]. Available: <http://www.fakel.ua/ru/products/gts/75/83/>, Accessed on: March 04, 2019.

16. V. D. Bielousov, V. H Danylenko, N. I. Mishustyn, V. P. Rybakov. Pipe regenerators of JSC "ZiO-Podolsk", Gas-turbine technologies, no. 5, pp. 44-45, 2004.

17. Yu.I. Anoshkin, T.T. Aliiev, S.B. Pokhodiaev, A.O. Prokopets "Work results on introduction of regenerator of worm-pipe type performances for the gas-turbine setting of GTK-10", Gas-turbine technologies, no.5, pp. 26-28, 2006.

18. V. Gorbov, D. Solomonuk. "Decreasing the mass indices of gas turbine engines regenerators by means of choosing rational parameters", Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, no. 6/8(84), pp. 12 – 23, 2016.

19. S. M. Movchan, D. M. Solomonuk, "Prospects of the use of heat-exchange surfaces for the gas turbine plant regenerators intensifying the heat release by the ridges and cavities", Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment, No. 9(1231), pp. 45–51, 2017, ISSN 2078-774X, doi: 10.20998/2078-774X.2017.09.07.

УДК 621.438

В.М. Горбов, к.т.н, проф., **ORCID 0000-0002-9697-8083**

Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова

С.Н. Мовчан, нач. отдела, **ORCID 0000-0002-2893-7597**

**Державне підприємство "Науково-виробничий комплекс газотурбобудування "Зоря"-
"Машпроект"**

Д.Н. Соломонюк, к.т.н., **ORCID 0000-0002-3479-9397**

**Государственное предприятие "Научно-производственный комплекс газотурбостроения
"Зоря"- "Машпроект"**

ПЕРСПЕКТИВЫ МОДЕРНИЗАЦИИ ГТС УКРАИНЫ РЕГЕНЕРАТИВНЫМИ ГАЗОТУРБИНЫМИ УСТАНОВКАМИ

Определена экономия топливного газа в газотурбинных приводах газоперекачивающих агрегатов газотранспортной системы Украины за счет применения ГТУ с регенерацией теплоты. Замена в существующих регенеративных газотурбинных установках пластинчатых регенераторов новыми трубчатыми теплообменниками с повышением КПД до 31,2 % (вместо существующих 20–21,3 %), уменьшит общий расход топлива на приводные ГТУ на 7,4 %. Замена устаревших ГТУ новыми регенеративными установками с КПД 40,3 %, позволит снизить общий расход топлива на 3,0 %, при

модернізації ГТУ потужністю 16 МВт, на 18,1 % – при модернізації установок потужністю 10 МВт і на 4,2 % при модернізації установок потужністю 6 МВт. Рекомендовані параметри регенераторів для модернізації існуючих ГТУ: теплова ефективність 0,82, сумарні відносні втрати тис. робочого тіла 0,035, для нових установок – 0,837 і 0,032 відповідно. За рахунок застосування трубчастих поверхонь, профільованих лунками, можна знизити масу трубчатого регенератора на 15-20 % і наближити його показники до показників пластинчастих регенераторів.

Ключові слова: газотранспортна система, газотурбинні установки, регенерація теплоти, регенератор, коефіцієнт корисної дії, витрати палива.

Надійшла 17.05.2019

Received 17.05.2019

УДК 622.27:005.336.1:622.34.012

С.М. Стовпник, к.т.н, доц., ORCID 0000-0001-5664-8680

О.А. Темченко, д.т.н., проф., ORCID 0000-0003-0020-2430

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Криворізький економічний інститут ДВНЗ

«Київський національний економічний університет ім. В. Гетьмана»

ПРОБЛЕМИ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ГЕОТЕХНОЛОГІЙ НА ГІРНИЧОРУДНИХ ПІДПРИЄМСТВАХ

Розглянуто проблеми низької енергоефективності на гірничорудних підприємствах та перспективи впровадження конкурентоспроможних геотехнологій виробництва залізомісткої продукції на Україні. Систематизовані передумови формування та перспективи впровадження ефективних геотехнологій підземної та відкритої розробки залізничних родовищ в умовах трендів сталого розвитку. Наведено науково-технічні проблеми видобутку залізних руд, що впливають на економічну доцільність подальшої розробки родовищ корисних копалин України відкритим способом на глибоких горизонтах кар'єрів (понад 400 м). Запропоновані пріоритетні напрями досліджень щодо впровадження стратегій підвищення енергоефективності вітчизняних гірничорудних підприємств в умовах невизначеності.

Ключові слова: енергоефективність, геотехнологія, гірничорудні підприємства, спосіб розробки залізничних родовищ.

Вступ

В теперішній час цілком зрозуміло, що перед людством стоїть проблема вичерпання запасів горючих копалин, які є одночасно найціннішою хімічною сировиною. При цьому застосування всіх видів палива супроводжується інтенсивним забрудненням навколишнього середовища. Дефіцит енергії змушує людство залучати до енерговиробництва більш широке коло природних явищ, шукати надійні шляхи і способи підвищення коефіцієнту корисної дії, виробництва і використання енергії, а також ширше впроваджувати ресурсозберігаючі екологічно безпечні геотехнології, зокрема на енергоємних технологічних процесах видобутку, транспортування, дроблення та збагачення залізної руди на потужних гірничозбагачувальних комбінатах [1-3]. Сучасні тенденції збільшення споживання енергоресурсів призводять до вражаючих негативних наслідків з одночасним ускладненням екологічного навантаження на довкілля. Виконані дотепер дослідження показують, що, незважаючи на певні досягнення в області енергозбереження [4-7], є значний нереалізований потенціал науково обгрунтованого управління енергетичними ресурсами на підземних гірничих роботах для підвищення їх енергоефективності [8-12].

© С.М. Стовпник, О.А. Темченко, 2019

Тому, в умовах зростаючого дефіциту енергоресурсів вирішення проблеми підвищення економічного потенціалу України можливе шляхом розробки і широкого впровадження енергозберігаючих технологій із застосуванням інтелектуальних інформаційних систем. Аналіз роботи сучасних залізрудних підприємств й наукової літератури свідчать про низький рівень технологічного забезпечення енергоемності товарної продукції у порівнянні з закордонними аналогами. Незважаючи на те, що в цьому напрямку проводяться теоретичні й практичні роботи, стосовно гірничорудних підприємств Кривбасу комплексні системні дослідження з проблеми управління стратегічними змінами в контексті підвищення їх енергоефективності на основі енергетичної та еколого-економічної оцінки ефективності видобутку та переробки залізних руд з урахуванням сучасних трендів глобальної економіки за останній час практично не виконувалися, що вказує на їх актуальність.

Мета та завдання роботи

З урахуванням вищезазначеного мета та ключове завдання роботи полягають у визначенні пріоритетних заходів щодо впровадження ефективних геотехнологій та стратегій стійкого розвитку з позиції підвищення енергоефективності на сучасних гірничорудних підприємствах в умовах невизначеності.

Матеріал та результати досліджень

Досягнення поставленої мети пропонується вирішити шляхом прогнозування впливу конструктивних елементів та геометричних параметрів систем розробки при випуску і доставці залізної руди на надійність основних технологічних процесів з використанням інтелектуальних інформаційних систем в контексті впровадження заходів з енергозбереження електроенергії, стислого повітря та інших допоміжних ресурсів, при проведенні підземних гірничих робіт на глибоких горизонтах шахт (понад 1500 м) та подальшого відпрацювання залізрудних родовищ корисних копалин України відкритим способом на значних глибинах в кар'єрах (понад 400 м).

Отже, визначальними факторами низької енергоефективності на гірничорудних підприємствах України в теперішній час є:

а) недостатній контроль над процесом споживання енергетичних ресурсів, а саме: облік витрат енергоресурсів не враховує всі їх види, що не дозволяє скласти відповідні баланси енергоспоживання; при цьому такий облік зазвичай не інтегровано з показниками, що характеризують обсяги гірничого виробництва; режими управління енергоспоживаючим устаткуванням на окремих технологічних процесах видобутку руди не забезпечують мінімізації витрат енергоресурсів;

б) планування, оперативне управління та звітність практично не враховують витрати енергетичних ресурсів відносно виконаних обсягів гірничого виробництва та умов технологічного процесу, що змінюється за звітний період;

в) управління енергоресурсами на гірничорудних підприємствах з підземним способом видобутку руди в недостатньому ступеню використовує як технічні (коефіцієнт корисної дії, коефіцієнт потужності, коефіцієнт завантаження спеціалізованого обладнання), так і управлінські (організація, мотивація, інформаційне, маркетингове, інвестиційне забезпечення) чинники. При цьому майже не проводиться якісний енергоаудит поточної оцінки стану управління енергоресурсами;

г) основні засоби, і власне технологічні процеси шахт і рудників характеризуються високою енергоемністю на фоні застосування фізично та морально спрацьованого гірничого устаткування (понад 70 %);

д) недостатнє інвестування енергоефективності, що не дозволяє широко впроваджувати на підземних гірничих роботах енергозберігаючі заходи, а також поліпшувати екологічну ситуацію у навколишньому середовищі регіону;

е) програми підвищення енергоефективності на гірничорудних підприємствах недостатньо враховують сучасні концепції управління енергоресурсами, що повинні базуватися на положеннях і методах енергетичного менеджменту, без відповідного техніко-економічного обґрунтування, що суттєво ускладнює подальший стійкий розвиток вітчизняних промислових компаній, особливо за складних умов господарювання, економічної нестабільності та невизначеності перспектив діяльності;

Рівень енерговитрат на гірничорудних підприємствах (електроенергії, енергії буро-вибухових робіт, стислого повітря, технічної води, теплової енергії при обігріву стовбурів взимку) обумовлюється, насамперед, властивостями гірських порід, технологічними можливостями застосовуваного устаткування і організацією гірничого виробництва. Тому проблему енергозбереження необхідно вирішувати з використанням сучасних інтелектуальних інформаційних систем, розглядаючи основні технологічні процеси видобутку і переробки залізної руди в єдиній організаційній сукупності.

Відомо, що значний вплив на показники енергоефективності подальшої експлуатації залізрудних родовищ України відкритим способом на значних глибинах (понад 400 м) чинить обрана система його розробки. Кожна система має визначені елементи (висота уступу, ширина робочої площадки, довжина

фронті гірничих робіт тощо), параметри яких, насамперед, залежать від обраних видів та типів гірничотранспортного устаткування, зокрема автомобільного.

В якості визначального критерію при встановленні ступеня ефективного використання автомобільного транспорту на рудних кар'єрах передбачається середньозважений ухил автошляхів, який обумовлює умови експлуатації автотранспорту при максимальній глибині відкритих гірничих робіт до 850 м. При цьому умовні витрати палива при транспортуванні гірничої маси кар'єрними автосамоскидами складають 80-140 г/т-км, тобто при перевезенні 1 т гірничої маси необхідно витратити до 2 л дизельного палива. Наприклад, автосамоскид вантажопідйомністю 110 т витрачає приблизно 465 л палива на 100 км. Тому, у загальній собівартості транспортування гірничої маси витрати на дизельне паливо в теперішній час складають 15...30 %.

Перехід на автомобільно-конвеєрний транспорт для більшості сучасних кар'єрів відбувається на глибині понад 100 м. Нижня межа використання конвеєрного підйомника залежить від витрат на гірничо-капітальні роботи (проведення траншей, стовбурів, облаштування естакад, мостів), на облаштування галерей та спорудження будівель перевантажувальних вузлів з їх устаткуванням. При цьому, продуктивність конвеєрного підйомника не залежить від глибини розташування перевантажувального пункту, що є основною перевагою перед автомобільно-скаповим транспортом. В глибоких кар'єрах скапові підйомники ефективно застосовувати до глибини 400 м (зокрема, 250...350 м), рідше на діючих родовищах до 450 м. Вже на глибинах після 350 м скапове устаткування стає громіздким, потребує використання канатів великого діаметра та по енергетичним витратам є не конкурентоспроможним по відношенню до автомобільно-конвеєрного транспорту, зокрема, з збільшенням глибини розташування перевантажувального пункту суттєво знижується продуктивність кар'єрного скапового підйомника.

Проведений аналіз енергоефективності гірничого виробництва дозволяє стверджувати, що можливість використання різних технологічних процесів, окремих видів і типів устаткування й технологічних схем їх взаємодії, певних способів здійснення видобувних і розкривних робіт дозволяє формувати безліч технологічних варіантів розробки родовища. При цьому вибір певної організаційно-технологічної схеми розглядається як динамічна сукупність кар'єрного устаткування і гірничотехнічних елементів, зокрема, відображення динаміки розташування кар'єрного устаткування та динаміки зміни елементів систем розробки і розкриття, їх параметрів, наприклад, визначення кількісних та якісних показників вантажопотоків.

Оскільки всі гірничі підприємства мають власні унікальні умови розробки родовищ корисної копалини, що відрізняють їх один від одного, а також різні техніко-економічні показники, які дозволяють їм займати певні місця у ринковому середовищі, виникає проблема їх рейтингової оцінки. Однак рейтингова оцінка це статична характеристика, яка дозволяє визначати сучасний стан підприємства. Для того щоб одержувати перемогу у ринковій боротьбі необхідно постійно й наполегливо займатись удосконаленням виробничо-господарської діяльності. Тому проблема полягає не тільки в оцінці, але й у формуванні ефективної стратегії подальшої розробки родовищ корисних копалин з позиції забезпечення конкурентоспроможності товарної продукції та можливості підвищення її конкурентних переваг на Європейському та світовому ринку залізорудної сировини.

Аналіз наукових праць і практики роботи глибоких залізорудних кар'єрів показує, що існує цілий ряд характерних проблем, обумовлених: істотним збільшенням витрат на видобуток корисної копалини у зв'язку з досягненням кар'єрами глибини 400 метрів і більше; обмеженими можливостями в інтенсифікації виробничих процесів через скорочення фронту робіт, у тому числі при вирішенні задачі формування оптимальних кар'єрних рудопотоків та забезпечення надійності функціонування гірничотранспортних комплексів у несприятливих умовах в контексті підвищення ефективності залізорудного виробництва; зменшенням ґрунтовних досліджень щодо перспектив подальшого ефективного застосування відкритої гірничої технології за останні 30 років, і відповідно відсутністю належного практичного досвіду ведення гірничих робіт на великих глибинах; відсутністю апробованих науково-методичних рекомендацій із проектування розвитку гірничих робіт у глибоких кар'єрах на основі економічних показників.

Значна частина цих проблем є наслідком погіршення гірничо-геологічних умов виробництва з ростом глибини гірничих робіт, а також відсутністю науково проробленої концепції та стратегій розвитку кар'єрів на весь строк експлуатації залізорудного родовища. У той же час практика роботи потужних глибоких кар'єрів вказує на те, що вже сформовано передумови для вирішення вище перерахованих проблем: розроблені й випускаються промисловістю мобільні дробильно-перевантажувальні пункти у комбінації з мобільними міжступінними перевантажувачами, озброєними крутопохилими (до 45°) конвеєрами; досягнуто істотного прогресу у проведенні буро-вибухових робіт, що забезпечує високу ефективність підготовки гірничої маси до транспортування конвеєрами; накопичено досвід роботи з навантажувально-транспортним устаткуванням великої продуктивності та одиначної потужності.

Отже, необхідно розробити сучасні рекомендації для встановлення раціональних параметрів відкритої розробки родовищ. Підвищення ефективності відкритої розробки родовищ базується на ідеї

широкого впровадження ресурсо- енергозберігаючих та природоохоронних технологій, що передбачає вирішення таких питань, як: складання балансу по мінеральній сировині; створення умов для залучення усіх мінерально-сировинних ресурсів у господарський оборот з максимальним використанням їх відходів і ліквідацією неминучих залишків; повний облік усіх можливих джерел утворення мінеральної сировини не тільки природного, але й техногенного походження.

В останні десятиріччя на багатьох гірничорудних підприємствах відбувалося значне недовиконання обсягів розкривних робіт по відношенню до проектних показників. Це було викликано скороченням поточних обсягів розкривних робіт, яке відбулося за рахунок подвоєння уступів, скорочення ширини робочої площадки, що призвело до зменшення довжини активного фронту гірничих робіт та створення тимчасово неробочих бортів у кар'єрі. У цих умовах з'являються не передбачені проектом ділянки робіт, де продуктивність екскаваторно-автомобільного комплексу устаткування стає нижчою з урахуванням роботи гірничотранспортного устаткування на здвоєних уступах, відпрацювання вузьких заходок, збільшення тривалості рейсу автосамоскидів за відсутності наскрізного проїзду по горизонту тощо. За таких обставин з'являється об'єктивна необхідність підвищення ефективності використання устаткування, у тому числі шляхом забезпечення оптимізації параметрів робочого борту кар'єру на основі математичного моделювання його побудови. Тому, технологічні передумови, що формують та визначають ефективність відпрацювання запасів родовища, важливо доповнити теоретичними напрацюваннями з питань формування обґрунтованої стратегії розвитку кар'єру на весь період його експлуатації. При цьому визначальним напрямком є вибір технологічних комплексів транспортування гірничої маси відповідно до раціональної області їх використання, оскільки помилки у виборі транспортного технологічного комплексу на початковому етапі призведуть до необхідності продовження строку їх роботи в нераціональній області й зменшать ефективність розробки родовища в цілому. Отже, в теперішній час для успішного проведення стратегічних змін з метою підвищення ефективності виробничо-господарської діяльності гірничорудних підприємств України необхідно розробляти і впроваджувати нові підходи щодо методів оцінки й оптимізації параметрів гірничих робіт, засновані на раціональному використанні ресурсів, що беруть участь при розробці і ефективній подальшій експлуатації залізрудного родовища.

Традиційна технологія ведення відкритих гірничих робіт на глибоких горизонтах кар'єрів майже вичерпала свої можливості. Тому необхідно оперативнo впроваджувати більш прогресивні способи розробки родовищ, що передбачають своєчасну утилізацію максимальних обсягів відходів гірничорудного виробництва у вироблених просторах, збільшення кутів укосів нижніх ділянок бортів кар'єрів з подальшим їх підтриманням у стійкому стані піднавантаженням розкривними породами, підірними ціликами або відповідним режимом відкритих і підземних робіт. Поліпшення екологічної ситуації в регіонах, підтримання потужностей з видобутку руд і підвищення ефективності гірничого виробництва можливі за рахунок комплексного способу розробки родовищ корисних копалин, що дозволить зберегти не тільки навколишнє середовище за рахунок своєчасного розміщення максимальних обсягів відходів гірничо-металургійного комплексу у вироблених просторах, скорочення площ вилучених земель і повного вилучення цінних компонентів з порід і руд, що виймаються, але й знизити на 26...38% капітальні та поточні витрати шляхом організації єдиної схеми розкриття, осушення, провітрювання, електропостачання з одночасним поліпшенням довкілля тощо.

Сучасний гірничо-збагачувальний комбінат переробляє близько 35 млн. тон сирової руди, при видобутку якої на залізрудних кар'єрах використовується в основному електроенергія, дизельне паливо і енергія вибухових речовин (ВВ), а також застосовується обладнання з встановленою потужністю близько 700 МВт, зокрема, на виробництво товарної залізвмісткої продукції витрачається близько 2,5 млрд. кВт.год електричної енергії. Постачання таких підприємств електроенергією здійснюють напругою 110 - 120 кВ з облаштуванням декількох підстанцій глибокого вводу. Електроприймачі живляться напругою 6-10 кВ і 0,4 кВ, а основними споживачами є: бурові верстати, екскаватори, електровозний транспорт, конвеєрні підйомники з дробарками. З урахуванням вищезазначеного зрозуміло, що основну частку в кошторису операційних витрат для видобутку 1 т руди на сучасних залізрудних кар'єрах становлять саме витрати на енергоресурси. Зокрема, орієнтовний розподіл сумарних енерговитрат на гірничо-збагачувальних комбінатах України виглядає наступним чином: на видобуток 1 тони сирової руди припадає 6,4 - 8,3 кВт-год електроенергії, на внутрішньокар'єрний транспорт рудника - 3,0- 3,5 кВт-год., і транспортування залізрудної сировини з поверхових площадок кар'єра до збагачувальних фабрик – 2-3 кВт-год, а для отримання 1 тони товарного концентрату витрачається близько 145 кВт.год електроенергії. Отже, найбільш енергоємним технологічним процесом переробки руди є збагачення, у якому витрачається близько 20% всіх енергоресурсів комбінату і є основним споживачем електроенергії – понад 45 % загальних витрат, а на подрібнення мінеральної сировини приходиться до 30% зазначених витрат. Разом з тим, витрати на амортизацію з метою відновлення техніко-експлуатаційних характеристик застарілого гірничого устаткування в цілому по гірничозбагачувальним підприємствам Кривбасу за 2016 – 2017 роки змінюються лише в межах від 23,8% до 18,5%, причому спостерігається тенденція до їх зниження, що

негативно впливає на можливості оновлення техніко-технологічної бази і відповідно зниження значних коефіцієнтів спрацювання енергоємного обладнання на рівні 70 % по основним технологічним переділам видобутку і переробки залізорудної сировини. Енергетичні витрати на матеріали протягом останніх років мають тенденції суттєво підвищуватись і досягають 50 % усіх операційних витрат гірничорудного підприємства.

Значимість підвищення ефективності енергозбереження на сучасних кар'єрах обумовлюється загальним зростанням потреби в енергії, відносною обмеженістю і подорожчанням первинних енергоресурсів, посиленням екологічних вимог до гірничодобувної галузі вітчизняної промисловості та до охорони навколишнього середовища в цілому. За таких умов успішний розвиток енергоефективності буде полягати в нарощуванні обсягів виробництва первинних енергоресурсів при пріоритетному впровадженні енергозбереження, насамперед, в енергоємні технологічні процеси, зокрема на етапі подрібнюванні залізорудної сировини кульовими млинами.

Висновки

З урахуванням вищезазначеного, перспективними напрямками подальшої ефективної експлуатації залізорудних родовищ України відкритим способом є:

розробка та оперативне впровадження обґрунтованих ресурсозберігаючих екологічно безпечних геотехнологій та природоохоронних стратегій своєчасного переходу на комбінований відкрито-підземний спосіб відпрацювання певного родовища корисних копалин;

використання підземних виробок для транспортування гірничої маси автосамоскидами, а також застосування сучасних дизель-тролейзовів та похилих кар'єрних автомобільних підйомників і похилих кар'єрних конвеєрних або скіпових підйомників з метою комплексного відпрацювання глибоких горизонтів крутопохилих родовищ в найближчій перспективі;

впровадження мобільних дробарних комплексів у кар'єрі та внутрішнього відвалоутворення;

здійснення енергозбереження за рахунок широкого впровадження у технологічний процес видобутку і переробки руди ресурсо- та енергозберігаючих заходів, у тому числі шляхом підвищення куту укоса робочого та неробочого бортів кар'єру, а також створення сучасних екологічнобезпечних міні-металургійних заводів;

технічне переозброєння гірничих підприємств та створення ефективної системи усереднення руди, а також формування стаціонарних та тимчасових перевантажувальних пунктів;

прийняття обґрунтованих рішень та управлінських заходів на основі розрахунку економічних індикаторів як ключових факторів успіху з визначенням доцільності здійснення технологічних змін у виробництві за певних ситуацій на ринку залізорудної сировини.

Для підвищення енергоефективності підземних гірничих робіт в мінливих умовах економічної нестабільності та невизначеності цінних характеристик товарної продукції необхідно встановити об'єктивні закономірності та взаємозв'язки між параметрами підземних виробок, послідовністю їх формування, технологічними процесами гірничих робіт з позиції зниження їх енергоємності, екологічної безпеки та економічної доцільності подальшого вилучення корисних копалин із надр на глибоких горизонтах шахт і рудників в складних гірничо-геологічних умовах. З урахуванням вищенаведеного, основні напрямки фундаментальних досліджень в галузі перспектив ефективного застосування підземних геотехнологій для подальшого освоєння родовищ пов'язан з наступними проблемами:

- створення підземних рудників багатфункціонального призначення, що забезпечують раціональне використання і своєчасне відтворення георесурсу надр різного призначення;

- розробка комбінованих ресурсо та енергозберігаючих геотехнологій реконструкції підземних рудників, спрямованих на збереження і розвиток їх виробничого потенціалу в нових складних макроекономічних і екологічних умовах та невизначеності цінних характеристик вітчизняної продукції на ринках мінеральної сировини;

- наукове обґрунтування стратегії збалансованого функціонування та розвитку гірничорудної та машинобудівних галузей, та у цілому гірничо-металургійного комплексу України.

Список використаних джерел

1. Бардась А. В. Науково-технічні принципи впровадження ресурсозберігаючих екологічно безпечних геотехнологій / А. В. Бардась, К. С. Богач // Сталий розвиток економіки. - 2013. - № 1. - С. 177-180. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/sre_2013_1_40.

2. Анистратов Ю.И. Расчётно-теоретические предпосылки энергосбережения на рудных карьерах / Ю.И. Анистратов, С.А. Гончаров // Горный журнал. - 2009. - №11. - С. 21-23.

3. Кравець В.Г. Дослідження надійності функціонування гірничотранспортного устаткування на глибоких залізорудних кар'єрах / В.Г. Кравець, О.А. Темченко, В.В. Вапнічна, Г.В. Шиповський // Вісник НТУУ "КПІ". Серія "Гірництво": Зб. наук. праць. - К.: НТУУ "КПІ", 2016. - Вип. 30.- С. 48- 60.

4. Бережний Є.О. Энергоэффективность Украины: виклики часу / Є.О. Бережний та ін. // Вісник Національної академії наук України. — 2013. — № 7. — С. 61—69.
5. Давидова Ю.В. Досвід Європейського Союзу у сфері підвищення енергоефективності / Ю.В. Давидова, В.О. Струк // Ефективність державного управління. — 2013. — Вип. 34. — С. 165—172.
6. Денисенко Л.О. Система енергетичного менеджменту як основа ефективного управління енергоспоживанням [Електронний ресурс] / Л.О. Денисенко, Р.Л. Малогловець. // Технології та дизайн. — 2013. — № 3. — Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/td_2013_3_19.
7. Домбровський З.І. Напрями удосконалення управління проектами енергоефективності / З.І. Домбровський // Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності. — 2012. — № 6. — С. 54—57.
8. Розен В.П. Режимы, параметры та ефективність функціонування систем електропостачання підземних рудників / В.П. Розен, Р.О. Пархоменко, К.Д. Казембе // Вісник Вінницького політехнічного інституту. - 2018. - № 1. - С. 86 -91.
9. Ляхомский А.В. Управление энергетическими ресурсами горных предприятий / А.В. Ляхомский, Г.И. Бабокин. - М.: Горная книга, 2011. - 232 с.
10. Ляхомский А.В. Энергетические показатели и критерии оценки энергоэффективности технологических процессов горного производства / А.В. Ляхомский, А.В. Пичуев, Е.Н. Перфильева // Труды международного научного симпозиума «Неделя Горняка-2014». Сборник статей. Отдельный выпуск Горного информационно-аналитического бюллетеня (научно-технического журнала), 2014. - С. 450–459.
11. Троицкий-Марков Т.Е. Принципы построения системы мониторинга энергоэффективности. / Т.Е. Троицкий-Марков, Д.В. Сенновский // Мониторинг. Наука и безопасность. 2011. - Т. 4. - С. 34-39.
12. Новиков В.В. Интеллектуальные измерения на службе энергосбережения / В.В. Новиков // Энергоэксперт. – 2011. – № 3. – С. 68-70.

УДК 622.27: 005.336.1: 622.34.012

С.М. Стовпник, к.т.н., доц., **ORCID** 0000-0001-5664-8680
О.А. Темченко, д.т.н., проф., **ORCID** 0000- 0003- 0020 - 2430
Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»,
Криворожский экономический институт ГВУЗ
«Киевский национальный экономический университет им. В. Гетьмана»

ПРОБЛЕМЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ГЕОТЕХНОЛОГИЙ НА ГОРНОРУДНЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

Рассмотрены проблемы низкой энергоэффективности на горнорудных предприятиях и перспективы внедрения конкурентоспособных геотехнологий производства железосодержащей продукции на Украине. Систематизированы предпосылки формирования и перспективы внедрения эффективных геотехнологий подземной и открытой разработки железорудных месторождений в условиях трендов устойчивого развития. Приведены научно-технические проблемы добычи железных руд, влияющие на экономическую целесообразность дальнейшей разработки месторождений полезных ископаемых Украины открытым способом на глубоких горизонтах карьеров (более 400 м). Предложены приоритетные направления исследований по внедрению стратегий повышения энергоэффективности отечественных горнорудных предприятий в условиях неопределенности.

Ключевые слова: энергоэффективность, геотехнология, горнорудные предприятия, способ разработки железорудных месторождений.

S. Stovpnyk, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0001-5664-8680

O. Temchenko, Dr. Eng. Sc., Prof., ORCID 0000-0003-0020-2430

¹National Technical University of Ukraine

«Igor Sikorsky Kiev Polytechnic Institute»

²Kryvyi Rih Economic Institute of SHEE «Kyiv National Economic University named after Vadym Hetman»

THE PROBLEM OF IMPROVING THE EFFICIENCY OF GEOTECHNOLOGY IN MINING COMPANIES

The problems of low energy efficiency in mining enterprises and the prospects for the introduction of competitive geotechnologies of production of iron-containing products in Ukraine are considered in the study. Preconditions of formation and prospects of introduction of effective geotechnologies of underground and strip mining of iron ore deposits in the conditions of sustainable development trends are systematized. The scientific and technical problems of iron ore mining, affecting the economic feasibility of further development of mineral deposits of Ukraine open pit on the deep horizons of quarries (more than 400 m). The priority directions of research on the implementation of strategies to improve the energy efficiency of domestic mining enterprises in the face of uncertainty.

Key words: energy efficiency, geotechnology, mining enterprises, method of field development of iron ore deposits.

References

1. A. V. Bardas', and K. S. Bohach, "Scientific and technical principles of implementation of resource-saving environmentally friendly geotechnologies", *Sustainable economic development*, no. 1, pp. 177-180, 2013.
2. YU.I. Anistratov, and S.A. Goncharov, "Calculation and theoretical prerequisites of energy saving at ore mines", *Mining journal*, no. 11, pp. 21-23, 2009.
3. V.H. Kravets', O.A. Temchenko, V.V. Vapnichna, and H.V. Shypovs'kyi, "Research of reliability of functioning of the mining transport equipment on deep iron ore open-cast mine", *Bulletin of NTUU "KPI". Series "Mining": Collection of scientific works*, no. 30, pp. 48-60, 2016.
4. YE.O. Berezhnyy, "Energy efficiency of Ukraine: challenges of the time", *Bulletin of the National Academy of Sciences of Ukraine*, no. 7, pp. 61-69, 2013.
5. YU.V. Davydova, and V.O. Struk, "The experience of the European Union in the field of energy efficiency", *Effectiveness of public administration*, no. 34, pp. 165-172, 2013.
6. L.O. Denysenko, and R.L. Malohlovet's', "Energy management system as a basis for effective energy management", *Technology and design*, no. 3, 2013.
7. Z.I. Dombrovs'kyi, "Areas for improvement of energy efficiency project management", *Bulletin of Lviv state University of life safety*, no. 6, pp. 54-57, 2012.
8. V.P. Rozen, R.O. Parkhomenko, and K.D. Kazembe, "Modes, parameters and efficiency of underground mine power supply systems", *Bulletin of Vinnitsa Polytechnic Institute*, no. 1, pp. 86-91, 2018.
9. A.V. Lyakhomskyy, and H.Y. Babokyn, *Management of energy resources of mining enterprises*. Moscow, Russia: Mountain book, 2011.
10. A.V. Lyakhomskyy, A.V. Pychuev, and E.N. Perfyl'eva, "Energy performance and assessment criteria of efficiency of technological processes of mining production", in *International scientific Symposium "Miner's Week-2014"*, 2014, pp. 450-459.
11. T.Ye. Troitskiy-Markov, and D.V. Sennovskiy, "Principles of construction of energy efficiency monitoring system", *Monitoring. Science and security*, vol. 4, pp. 34-39, 2011.
12. V.V. Novikov, "Intelligent measurements in the service of energy saving", *Energy expert*, no. 3, pp. 68-70, 2011.

Надійшла 15.04.2019

Received 15.04.2019

УДК 022.33:621.86.0676622.271.4

О.М. Терентьев, д-р. техн. наук, проф, ORCID 0000-0003-2523-2804

А.Й. Клещов, канд. техн. наук., ORCID 0000-0002-9412-4156

А.І. Крючков, канд. техн. наук., доцент, ORCID 0000-0002-2234-0546

М.І. Сергієнко, ORCID 0000-0001-8284-9072

Національний технічний університет України “Київський Політехнічний Інститут імені Ігоря Сікорського”

ТЕХНОЛОГІЧНІ ПАРАМЕТРИ РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД ПРИ КЛАСИЧНОМУ І МОЛЕКУЛЯРНО-ХВИЛЬОВОМУ ПІДХОДАХ

У статті розглянуті актуальні питання підвищення ефективності руйнування гірських порід застосуванням класичного підходу на основі задачі Бусинеска з використанням гіпотези контурів деформації. Визначені умови формування ядра ущільнення при руйнуванні гірської породи різцем ковша роторного екскаватора. Встановлений зв'язок геометричних параметрів ядра ущільнення та механічних характеристик процесу руйнування гірської породи різцем ковша. Використаний аналітичний підхід дозволив розрахувати теоретичну та експлуатаційну продуктивність копання роторного екскаватора в залежності від фізико-механічних властивостей гірських порід. Встановлені енергетичні та технологічні параметри процесів копання дозволили встановити вплив геометричних, кінематичних та динамічних чинників на питому енергоємність руйнування гірської породи ротором екскаватора. Одержані залежності потужності процесу копання від його продуктивності свідчать про їх екстремальний зв'язок, що дозволяє встановити режими копання і знизити енергоємність процесу.

Ключові слова: гірська порода, роторний екскаватор, руйнування, ядро ущільнення, продуктивність, питома енергоємність, ККД, якість екскавації.

Вступ. Ефективність процесів руйнування породного масиву робочим органом визначається оптимальністю функціонування систем типу “Породний масив – робочий орган – привод”. Керування системою вимагає встановлення якісно-кількісних співвідношень і просторових форм параметрів системи.

Обґрунтування актуальності питань, що розглядаються. При руйнуванні гірської породи відбувається вигин і розриви контурів з наступним відколом елементів масиву. У результаті виникнення мікротріщин розриву і мікро сколювання елементів породного масиву утворюється ядро ущільнення. Через диспергований матеріал в ядрі ущільнення на масив діє гнучке навантаження зі сферичним розподілом тиску, з максимальним значенням тиску у центрі площадки контакту. З ростом зовнішньої сили, а, отже, і внутрішніх опорів породного масиву у ньому накопичується потенціальна енергія. Прогин контурів і тиск на поверхні контакту збільшуються, відповідно зростає напруження. Зруйнований матеріал інтенсивно видаляється через зазори між ріжучим інструментом і гірською породою. Виникаючі при цьому сили тертя часток розтягують контур. Його максимальне подовження спостерігається у вершині ядра ущільнення. Це зумовлено тим, що контур у вершині сприймає найбільший тиск і відносно подовження. При досягненні цими величинами критичних значень у вершині ядра починається утворення тріщини відриву великого елемента стружки. Розкриття тріщини відбувається у бік вільної поверхні породного масиву.

Новизна роботи полягає в обґрунтуванні технологічних параметрів руйнування гірських порід при класичному й молекулярно-хвильовому підходах. Внаслідок концентрації напруження у вершині тріщини виникає хвильовий перерозподіл накопиченої породним масивом енергії. Тиск породного масиву під інструментом робочого органу викликає на поверхні масиву контактні напруження і руйнування його поверхневого шару. Це сприяє утворенню нової вільної поверхні. Значні розміри масиву забезпечують защемлення (лідуючих) верхніх контурів, вигин без зближення їхніх кінців до осі навантаження. Рівняння кривої описується функцією прогинів, яка визначається рішенням задачі Бусинеска [1]. При подальшому розтягненні контуру утворюються розриви в місцях максимального прогину. При достатньому зануренні інструмента відділення матеріалу, унаслідок зрушення, припиняється і ріст ядра ущільнення зупиняється.

Мета і задачі дослідження. Метою є вибір та обґрунтування виробничих граничних умов руйнування гірських порід а саме продуктивність, питома енергоємність, ККД та якість екскавації, при класичному й молекулярно-хвильовому підходах і розробка методики їх розрахунку.

Для реалізації мети поставлені наступні **задачі**. 1. З'ясувати можливість об'ємного моделювання ядра ущільнення при руйнуванні породного масиву. 2. Встановити залежності продуктивності, питомої енергоємності, ККД руйнування і якості руйнування вибою. 3. Розробити математичні моделі функціонування гірничих машин при класичному й молекулярно-хвильовому руйнуванні вибоїв. 4. Підготувати висновки і практичні рекомендації по вибору та забезпеченню технологічних виробничих граничних умов руйнування гірських порід.

Методи дослідження передбачають: використання задачі Буссинеска для моделювання контурів розтягнення вибою. Об'ємного моделювання елементів руйнування вибою. Математичні методи встановлення закономірності продуктивності, питомої енергоємності, ККД руйнування і якості функціонування машини.

Основні результати та їх обговорення. Занурення інструменту у породний масив супроводжується ущільненням елементів масиву з наступним обтіканням утвореного ядра породою, що руйнується. Ядро ущільнення з достатнім ступенем точності апроксимується замкнутою центральною поверхнею другого порядку, типу еліптичного параболоїда. Розрахункову схему визначення висоти ядра ущільнення пружно-пластичного масиву показано на рис. 1.

Тиск навантаження пружно-пластичного масиву для розриву контуру у вершині ядра [2, 3], Па:

$$P_0 = P_k \cdot e^{-f \cdot (h_{я} - h_1)}, \quad (1)$$

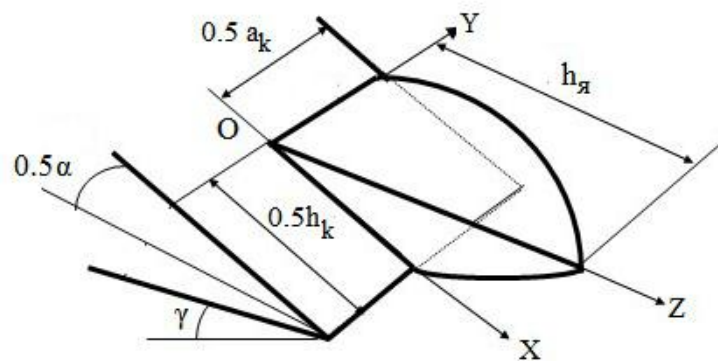


Рисунок 1 - Розрахункова схема визначення висоти ядра ущільнення

де P_k - контактна міцність породного масиву, Па;

$f=10/h_b$ – коефіцієнт згасання тиску під інструментом при збільшенні глибини занурення інструменту у породний масив, 1/м [3];

$h_я$ і h_1 – відповідно висота ядра ущільнення гірської маси перед інструментом і довжина стрілки округлення крайки інструменту, м.

Кількісне значення стрілки округлення крайки інструменту на порядок менше висоти ядра ущільнення. Тому її значенням можна знехтувати без суттєвого погіршення результату. Тиск P_0 у центрі площадки контакту інструмента з породним масивом приймає вигляд (1).

Глибина занурення інструмента в породний масив h_b визначається зусиллям подачі, що переборює реакцію середовища, м:

$$h_b = F / (\sigma_c \cdot \sqrt{2} \cdot a_k) = P \cdot S / (\sigma_c \cdot \sqrt{2} \cdot a_k \cdot N_i), \quad (2)$$

де F - зусилля подачі, Н;

σ_c - межа міцності породного масиву на стиснення, Па;

a_k - половина ширини контакту інструмента із породним масивом, м;

$\sqrt{2} \cdot a_k$ - половина ширини контуру, на якому діє контактний тиск, м;
 P - тиск на площі контакту S інструмента із породним масивом, Па;
 N_i - кількість інструментів за схемою руйнування породного масиву, шт.

Тиск на площадці контакту інструмента із породним масивом P з урахуванням потужності приводу базової машини, Па:

$$P = (\eta_p \cdot \sqrt{N_{II}^2 + N_p^2}) / \left(\sqrt{V_{II}^2 + V_p^2} \cdot S \right) \quad (3)$$

де N_{II} , N_p - відповідно потужність приводу подачі і різання, Вт;

η_p - ККД редуктора приводу,

V_{II} , V_p - відповідно середні швидкості подачі, різання, м/с;

S - площа контакту інструмента із породним масивом, м².

Розв'язуючи (1) відносно $h_{я}$, одержимо:

$$P_0 = P_k \cdot e^{-fh_{я}} \Rightarrow \frac{P_0}{P_k} = e^{-fh_{я}} \Rightarrow \ln \frac{P_0}{P_k} = -fh_{я} \Rightarrow h_{я} = \frac{1}{f} \ln \frac{P_k}{P_0}. \quad (4)$$

Значення висоти ядра ущільнення в залежності від параметрів породного масиву, робочого органу і приводу отримані після підстановки в (4) значення величин правої частини. З урахуванням того, що

$$P_0 = \frac{2 \cdot \sqrt{2 \cdot \sigma_p \cdot E}}{\pi \cdot (1 - \nu^2)} \quad \text{висота ядра ущільнення:}$$

$$h_{я} = \frac{\eta \cdot \sqrt{N_{II}^2 + N_p^2} \cdot \ln(P_k/P_0)}{10 \cdot \sqrt{2} \cdot a_k \cdot \sigma_0 \cdot \eta_p \cdot N_i \cdot \sqrt{V_{II}^2 + V_p^2}} = \frac{\eta \cdot \sqrt{N_{II}^2 + N_p^2} \cdot \ln[P_k \cdot \pi \cdot (1 - \nu^2) / (2 \cdot \sqrt{2 \sigma_p \cdot E})]}{10 \cdot \sqrt{2} \cdot a_k \cdot \sigma_0 \cdot \eta_p \cdot N_i \cdot \sqrt{V_{II}^2 + V_p^2}}. \quad (5)$$

де ν - коефіцієнт Пуассона;

σ_p - межа міцності породного масиву на розрив, Па;

E - модуль пружності масиву першого роду, Па;

σ_c - межа міцності породного масиву на стиснення, Па.

Для спрощення (1.5) з урахуванням [4, 5] що, $\sigma_p = (0.25 \dots 0.35) \sigma_0 = 0.3 \cdot \sigma_0$;

$\tau = (0.1 \dots 0.6) \cdot \sigma_0 = 0.5 \cdot \sigma_0$; $E = (120 \dots 160) \cdot \sigma_0 = 150 \cdot \sigma_0$; $\sigma_0 = 63 \cdot P_k^{0.6}$.

$$P_k^{\frac{3}{5}} = \frac{\sigma_0}{63} \Rightarrow P_k = \left(\frac{\sigma_0}{63} \right)^{\frac{3}{5}} = 3 \sqrt[5]{\left(\frac{\sigma_0}{63} \right)^5} = 63^{-\frac{5}{3}} \cdot \sigma_0^{\frac{5}{3}} = (0.015873) \cdot \sigma_0^{1.67}$$

Тоді висота ядра ущільнення (6)

$$h_{я} = \frac{\sqrt{N_{II}^2 + N_p^2} \cdot \ln \left[(0.015873 \cdot \sigma_0)^{1.67} \cdot \pi \cdot (1 - \nu^2) / (18.9737 \cdot \sigma_0) \right]}{14.1 \cdot a_k \cdot \sigma_0 \cdot \eta \cdot N_i \cdot \sqrt{V_{II}^2 + V_p^2}}. \quad (6)$$

Об'єм ядра ущільнення на зубі ковша роторного екскаватора СРС - 2000-28/3.5 при розробці породних масивів розраховувався відповідно по формулі:

$$V_{\text{я}} = \pi \cdot a_k \cdot h_k \cdot h_z \quad (7)$$

Розрахунок проведено на прикладі розробки гірських порід з модулем пружності $E=2,1$ ГПа роторним екскаватором SRS - 2000-28/3,5 (табл. 1).

Таблиця 1 - Кількісні значення параметрів математичної моделі функціонування роторного екскаватора SRS - 2000-28/3.5

| Параметр | Символьний вид | Розмірність | Чисельне значення | Бібліографічне джерело |
|-------------------------------------|----------------|--------------------------|--------------------------|------------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 1. Кількість різців ківша | N_i | Шт | 9 | [6] |
| 2. Питома поверхнева енергія масиву | γ | Дж/м ² | 33E-03 | [7] |
| 3. Постійна кристалічних ґрат | Y_0 | М | 2.14E-10 | [7] |
| 4. Радіус міжмолекулярних сил | a_0 | м | 1.85E-10 | [7] |
| 5. Розвал різу | B | м | $B1(D)=HJ^*.21^{\wedge}$ | - |
| 6. Шлях наповнення ківша | L_n | м | 6.28 | [8] |
| 7. Потужність приводу подачі | N_n | Вт | 466000 | [8] |
| 8. Потужність приводу різання | N_p | Вт | 126000 | [9] |
| 9. Модуль Юнга вибою | E | Па | 210E10 ⁶ | [9] |
| 10. Коефіцієнт Пуассона | ν | - | 0.3 | [10] |
| 11. На півширина різця | a_k | м | 0.049 | [6] |
| 12. Швидкість різання | V_p | м/с | 2.94 | [6] |
| 13. Швидкість подачі | V_n | м/с | 0.33 | [6] |
| 14. ККД руйнування | η_p | відн.од. | 0.04 | [9] |
| 15. Контактна міцність масиву | P_y | Па | 37 500 000 | [9] |
| 16. Опір руйнуванню | τ | Па | 3 000 000 | [10] |
| 17. Ширина ріжучої крайки | L_1 | м | 0.44 | [6] |
| 18. Глибина занурення зубка | h_b | м | 0,085 | [8] |
| 19. Кількість ковшів на роторі | N_k | Шт | 22 | [8] |
| 20. Коефіцієнт наповнення | K_n | відн.од. | 0.8 | - |
| 21. Продуктивність | Π | м ³ | - | [8] |
| 22. Питома енергоємність | Q | Вт год/м ³ | табл.2 | [8] |
| 23. ККД | η | % | табл.2 | |
| 24. Якість | K | (м ³ /год)/гр | табл. 3 | |
| 25. Вартість години робіт | C | Гривни | 12.55 | [11] |

Коефіцієнт корисної дії при руйнуванні породного масиву:

$$\eta = \frac{A_c}{A_c + A_{\text{я}}} = \frac{A_c}{A_{\Pi}} = \frac{(X_p - h_{\text{я}}) \cdot (V_p - V_{\text{я}})}{V_p \cdot X_p} \cdot 100, \% \quad (8)$$

де $A_c = F_{\Pi} \cdot (X_p - h_{\text{я}}) \cdot K_v = F_{\Pi} \cdot (X_p - h_{\text{я}}) \cdot (V_p - V_{\text{я}}) / V_p$ - робота, що витрачається на утворення стружки, Дж;

$F_{\Pi} = N_n / V_n$ - зусилля на зубцях ківша ротора, Н;

N_n - потужність приводу подачі екскаватора, Вт;

V_n - швидкість подачі екскаватора, м/с;

$h_{\text{я}}$ - висота ядра ущільнення, м;

$K_v = (V_p - V_{\text{я}}) / V_p$ - коефіцієнт, що враховує утворення нових об'ємів при руйнуванні

породного масиву;

V_p - об'єм елемента, відокремлюваного від масиву за один цикл руйнування, м³;

$V_я$ - об'єм ядра ущільнення породного масиву, м³;

$A_я = F_я \cdot h_я = 0.5 \cdot k \cdot h_я^2$ - робота, необхідна для ущільнення (стиснення) елементів породного масиву, Дж;

$k = N_{\Pi} / (0.5 \cdot g_{\Pi} \cdot h_я)$ - коефіцієнт жорсткості ядра ущільнення, Н/м;

Лінійний розмір елемента руйнування породного масиву, що відповідає переміщенню ріжучої крайки зуба ківша екскаватора, необхідному для утворення елементарної стружки й відділення її від масиву, м:

$$X_p = \pm \sqrt{\frac{2h_я^2 \pm \sqrt{(2h_я^2)^2 + 4((1.1 \cdot h_я)^4 - h_я^4)}}{2}} \quad (9)$$

Експлуатаційна продуктивність екскавації:

$$\Pi = \frac{\kappa_э \cdot V_c \cdot 2A_k \cdot n_i \cdot (n_k / 4) h_p \cdot K_v \cdot V_p \cdot 3600}{T_1 \cdot V_я} \quad (10)$$

де $\kappa_э=0.6$ - коефіцієнт переходу від теоретичної продуктивності до експлуатаційної;

V_c і $V_я$ – відповідно, об'єм стружки і ядра ущільнення, м³;

$A_k=0,049$ – напівширина зубка на ковші екскаватора, м;

$n_i=9$ - кількість зубків на ковші, шт;

$n_k=22$ - кількість ковшів на роторному колесі екскаватора, шт.;

$h_p=1.5A_k$ - глибина занурення зубка у породний масив, м;

$K_v=0.8$ - коефіцієнт наповнення ковша;

$V_p=2.94$ - швидкість різання, м/с;

$T_1=30$ тривалість циклу з урахуванням швидкості обертання ротора й часу на повторне занурення у породний масив конкретного зубка, с.

Питома енергоємність руйнування:

$$q = N_{\Pi} / \Pi \quad (11)$$

де N_{Π} - потужність привода подачі екскаватора, Вт.

Якість екскавації:

$$K = \Pi / C \quad (12)$$

де C - вартість екскавації одного метра кубічного, грн.

За результатами розрахунку продуктивності й питомої енергоємності (табл. 2) та ККД і якості екскавації (табл.3) роторного екскаватора СРС- 2000-28/3.5 при керуванні швидкістю різання побудовані залежності висоти ядра ущільнення $h_я$, об'ємів ядра $V_я$ й стружки V_c (рис.2) і ВГУ (рис. 3) від швидкості різання.

Таблиця 2 - Продуктивність й питома енергоємність роторного екскаватора СРС- 2000-28/3.5 при керуванні швидкістю різання

| Швидкість різання, V_p , м/с | Висота ядра ущільнення, $h_я$, м | Об'єм ядра ущільнення, $V_я$, м ³ | Об'єм стружки, V_c , м ³ | Продуктивність, Π , м ³ / год | Питома енергоємність, q , Вт·год/м ³ |
|--------------------------------|-----------------------------------|---|---------------------------------------|--|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 0.20 | 10.376 E-02 | 15.906 E-06 | 70.892 E-05 | 2063.10 | 61.073E+00 |
| 0.65 | 10.155 E-02 | 15.567 E-06 | 81.618 E-05 | 2426.99 | 51.916E+00 |
| 1.10 | 97.407 E-03 | 14.932 E-06 | 80.555 E-05 | 2497.25 | 50.456E+00 |
| 1.55 | 91.999 E-03 | 14.103 E-06 | 79.127 E-05 | 2597.18 | 48.514E+00 |
| 2.00 | 85.991 E-03 | 13.182 E-06 | 15.891 E-04 | 5580.18 | 22.580E+00 |
| 2.45 | 79.896 E-03 | 12.248 E-06 | 14.312 E-04 | 5409.09 | 23.294E+00 |
| 2.90 | 74.042E-03 | 11.351 E-06 | 13.006 E-04 | 5304.12 | 23.755E+00 |

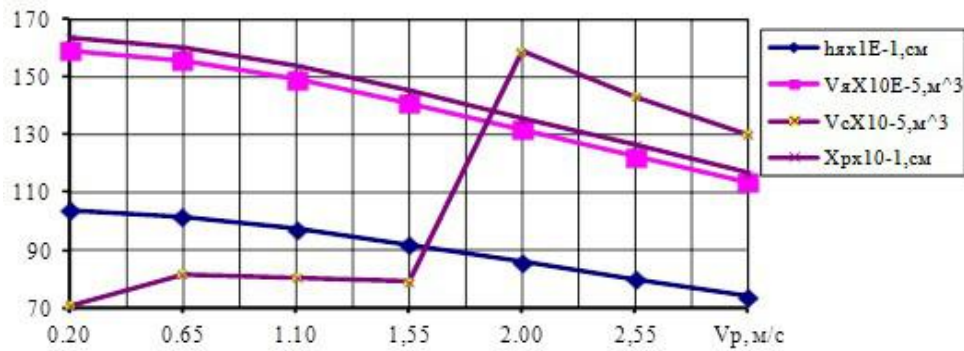


Рисунок 2 - Залежності висоти ядра ущільнення $h_{я}$, об'ємів ядра $V_{я}$ й стружки V_c від швидкості різання

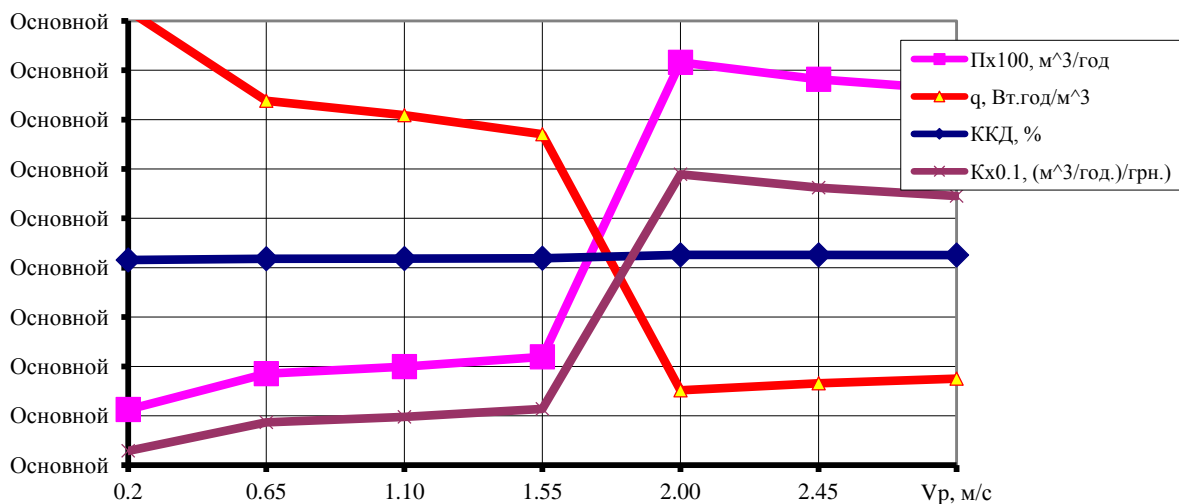


Рисунок 3 - Залежність продуктивності, питомої енергоємності, ККД і якості екскавації від швидкості різання роторного екскаватора SRS - 2000-28/3,5

Таблиця 3 - Результати розрахунку ККД і якості функціонування екскаватора SRS-2000-28/3.5 при керуванні швидкістю різання

| Швидкість різання, $V_p, \text{m/s}$ | Довжина елемента руйнування, X_p, m | Об'єм ядра ущільнення, $V_{я}, \text{m}^3$ | Об'єм стружки, V_c, m^3 | ККД, $\eta, \%$ | Якість $K, (\text{m}^3/\text{год.})/\text{Грн.}$ |
|--------------------------------------|--|--|----------------------------------|-----------------|--|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 0.20 | 16.367 E-02 | 15.906E-06 | 70.892 E-05 | 35.78 | 16.439 E-01 |
| 0.65 | 16.018 E-02 | 15.567E-06 | 81.618 E-05 | 35.90 | 19.339 E-01 |
| 1.10 | 15.364E-02 | 14.932E-06 | 80.555 E-05 | 35.92 | 19.898 E-01 |
| 1.55 | 14.511E-02 | 14.103E-06 | 79.127 E-05 | 35.95 | 20.695 E-01 |
| 2.00 | 13.564 E-02 | 13.103E-06 | 15.891 E-04 | 36.30 | 44.464 E-01 |
| 2.45 | 12.608 E-02 | 12.248E-06 | 14.312 E-04 | 36.29 | 43.100 E-01 |
| 2.90 | 11.619 E-02 | 11.315E-06 | 13.006 E-04 | 36.28 | 42.264 E-01 |

Найменування показників, символні і машинні позначення, їхня розмірність, початкові і кінцеві значення, а також крок змінних зведені в табл. 4.

Таблиця 4 - Найменування показників, символіні позначення, їхня розмірність, початкові і кінцеві значення змінних

| Найменування параметра | Символ у математ. моделі. | Розмірність | Початкові значення | Кінцеві значення |
|-------------------------------|----------------------------------|----------------|--------------------|------------------|
| 1 | 2 | 4 | 5 | 6 |
| Висота ядра ущільнення | Ня | М | 5.7E-03 | 2.0E-02 |
| Потужність приводу подачі | Нп | КВт | 222 | - |
| Потужність приводу різання | Нр | КВт | 466 | - |
| Межа міцності масиву на стиск | $\sigma_{ст}$ | Па | 1E+07 | 25E+07 |
| Коефіцієнт Пуассона | ν | - | 0.3 | - |
| На півширина інструмента | ак | м | 0.1 | 0.3 |
| КПД трансмісії | η_p | - | 0.75 | - |
| Швидкість подачі | V_p | м/з | 0.33 | - |
| Швидкість різання | V_r | м/з | 2.36 | - |
| Напруга зрушення | $\sigma_p=0.3 \cdot \sigma_{ст}$ | Па | 1E+07 | 25E+07 |
| Глибина різання | hp | М | 0.113 | - |
| Питоме зусилля різання | Руп | Па | 1.4E+06 | - |
| Кут загострення інструменту | θ | Рад-н | 20*0.17 | 120*.17 |
| Об'єм ядра ущільнення | $V_{я}$ | м ³ | 3.6E-06 | 4.94E-05 |

Результати розрахунку приведені в табл. 5 для масивів, що відрізняються межею міцності на стиск: вугільний прошарок - 10 МПа; аргілітові включення - 70 МПа; масив пісковика грубозернистого - 130 МПа; міцні гранітні масиви - (190...250) МПа.

Таблиця 5 – Показники функціонування екскаватора SRS-2000 28/35

| Ня, м | G0, МПа | Ак, м | V_p , м/с | hk, м | VJ, м ³ |
|---------|---------|-------|-------------|----------|--------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 0.02035 | 10 | 0.10 | 0.33 | 0.046332 | 0.0000494 |
| 0.01018 | 10 | 0.20 | 0.33 | 0.046332 | 0.0000494 |
| 0.00678 | 10 | 0.30 | 0.33 | 0.046332 | 0.0000494 |
| 0.00462 | 70 | 0.10 | 0.33 | 0.040576 | 0.0000102 |
| 0.00241 | 70 | 0.20 | 0.33 | 0.040576 | 0.0000102 |
| 0.00161 | 70 | 0.30 | 0.33 | 0.040576 | 0.0000102 |
| 0.00292 | 130 | 0.10 | 0.33 | 0.040170 | 0.0000061 |
| 0.00146 | 130 | 0.20 | 0.33 | 0.040170 | 0.0000061 |
| 0.00097 | 130 | 0.30 | 0.33 | 0.040170 | 0.0000061 |
| 0.00213 | 190 | 0.10 | 0.33 | 0.040022 | 0.0000045 |
| 0.00107 | 190 | 0.20 | 0.33 | 0.040022 | 0.0000045 |
| 0.00071 | 190 | 0.30 | 0.33 | 0.040022 | 0.0000045 |
| 0.00170 | 250 | 0.10 | 0.33 | 0.039945 | 0.0000036 |
| 0.00085 | 250 | 0.20 | 0.33 | 0.039945 | 0.0000036 |
| 0.00057 | 250 | 0.30 | 0.33 | 0.039945 | 0.0000036 |

Висновки

1. Обрані і обгрунтовані виробничі граничні умови руйнування гірських порід, а саме продуктивність, питома енергоємність, ККД та якість екскавації, при класичному й молекулярно-хвильовому підходах і розроблена методика їх розрахунку.

2. Встановлення якісно-кількісних співвідношень і просторових форм параметрів системи за допомогою розроблених математичних аналогів, які дозволили знизити втрати енергії при руйнуванні гірських порід.

3. За рахунок регулювання параметрами ядра ущільнення отримана 10 відсоткова збіжність аналітичних і експериментальні залежностей збільшення продуктивності з 2000 до 55000 м³/год та ККД з 30 до 35 % в діапазоні швидкості різання роторного екскаватора SRS - 2000-28/3,5 від 1.35 до 2.0 м/с

4. Питома енергоємність руйнування гірського масиву роторним екскаватором SRS - 2000-28/3,5 зменшилася з 48 до 20 Вт·год/м³ при контактній міцності масиву 37,0 МПа, опорі руйнуванню 3,0 МПа, модулі Юнга 210,0 МПа та коефіцієнті Пуассона 0,3.

Список використаної літератури

1. Коробова О. А. Лекции по Механике грунтов. [Текст]/О. Коробова - Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет, 2015 – 120 с.

2. Вихман Э. Квантовая механика /Э. Вихман [Перевод с англ. А.Казарин] М.: Наука, 1996. – 390с.
3. Протасов Ю.И. Разрушение горных пород / Ю.И. Протасов - М.: Недра, 2002. - 453 с.
4. Солод В.И. Горные машины и автоматизированные комплексы / В.И. Солод, В.И. Зайков, К.М. Первов – М.: Недра, 1998. – 503 с.
5. Суриков В.В. Механика разрушения мерзлых грунтов / В.В. Суриков – Л.: Стройиздат, Ленингр. Отделение, 1998. – 128 с.
6. Горовой А.И. Справочник по горно - транспортным машинам непрерывного действия / А.И. Горовой. – М.: Недра, отредактирован 04.09.2011 – 367 с.
7. Бакли Д. Поверхностные явления при адгезии и фрикционном взаимодействии / Д. Бакли : [пер. с англ. К. Павлова]. - М.: Машиностроение, 1996. – 360 с. Отредактирован 09.09.2016
8. Владимиров В.М. Карьерные роторные экскаваторы /В.М. Владимиров. - М.: Недра, 1992. - 278 с Отредактирован 25.10.2012
9. Справочник (кадастр) физических свойств горных пород. /Под ред. Н.В. Мельникова, В.В. Ржевского, М.М. Протодяконова. - М.: Недра, 1995. -379 с. Отредактирован 07.05.2009
10. Гетопанов В.Н. Горные и транспортные машины и комплексы / В.Н. Гетопанов, Н.С. Гудилин. - М.: Недра, 1991. - 304 с.
11. Рекомендации составления планово-расчетных цен на строительные материалы, конструкции и изделия, эксплуатацию строительных машин и механизмов, услуги автотранспорта и продукцию подсобного производства. (1 этап)/Министерство транспортного строительства. - Главное научно - техническое управление. Всесоюзный проектно - технологический институт транспортного строительства. – М.: ВНИТРАНССТРОЙ, 1990. -229 с.

УДК 022.33: 621.86.0676622.271.4

О.М. Терентьев, д-р. техн. наук, проф, **ORCID 0000-0003-2523-2804**

А.И. Клещев, канд. техн. наук, **ORCID 0000-0002-9412-4156**

А.И. Крючков, канд. техн. наук., доцент, **ORCID 0000-0002-2234-0546**

Н.И. Сергиенко, **ORCID 0000-0001-8284-9072**

Национальный технический университет Украины "Киевский Политехнический Институт имени Игоря Сикорского"

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ КЛАССИЧЕСКОМ И МОЛЕКУЛЯРНО-ВОЛНОВОМУ ПОДХОДАХ

В статье рассмотрены актуальные вопросы повышения эффективности разрушения горных пород применением классического подхода на основе задачи Бусинеска с использованием гипотезы контуров деформации. Определены условия формирования ядра уплотнения при разрушении горной породы резцом ковша роторного экскаватора. Установлена связь геометрических параметров ядра уплотнения и механических характеристик процесса разрушения горной породы резцом ковша. Использованный аналитический подход позволил рассчитать теоретическую и эксплуатационную производительность копания роторного экскаватора в зависимости от физико-механических свойств горных пород. Установленные энергетические и технологические параметры процессов копания позволили установить влияние геометрических, кинематических и динамических факторов на удельную энергоёмкость разрушения горной породы ротором экскаватора. Полученные зависимости мощности процесса копания от его производительности свидетельствуют об их экстремальной связи, что позволяет установить режимы копания и снизить энергоёмкость процесса.

Ключевые слова: горная порода, роторный экскаватор, разрушение, ядро уплотнения, удельная энергоёмкость, производительность, КПД, качество экскавации.

O. Terentyev, Dr. Eng. Sc., Prof., **ORCID 0000-0003-2523-2804**

A. Kleshchev, Cand. Sc. (Eng), **ORCID 0000-0002-9412-4156**

A. Kryuchkov, Cand. Sc. (Eng), Assoc. Prof., **ORCID 0000-0002-2234-0546**

N. Sergienko, **ORCID 0000-0001-8284-9072**

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

TECHNOLOGICAL PARAMETERS DESTRUCTION OF ROCKS AT CLASSICAL AND MOLECULAR WAVE APPROACHES

The article deals with topical issues of increasing the effectiveness of rock fracture using the classical approach based on the Businessk problem using the hypothesis of deformation contours. The connection between

the geometrical parameters of the sealing core and the mechanical characteristics of the process of rock destruction by the cutter of the bucket was established. The analytical approach used made it possible to calculate the theoretical and operational productivity of digging a rotary excavator, depending on the physical and mechanical properties of the rocks.

Studies have shown that as a result of the stress concentration at the crack tip, a wave redistribution of accumulated rock mass arises. The pressure of the rock mass under the tool of the working body causes on the surface of the array contact stresses and the destruction of its surface layer. This contributes to the formation of a new free surface. The large size of the array ensures that the (leading) upper contours are pinched, bending without converging their ends to the load axis. Further stretching of the contour breaks in places of maximum deflection. With sufficient immersion of the material separation tool, due to displacement, it stops and the growth of the compaction core stops.

Selected and justified production boundary conditions for the destruction of rocks, namely productivity, specific energy intensity, efficiency and quality of excavation, with classical and molecular-wave approaches, and the method of their calculation has been developed. Establishment of qualitative-quantitative relations and spatial forms of parameters of the system with the help of the developed mathematical analogues, allowed to reduce energy losses in the destruction of rocks. The established energy and technological parameters of the digging processes allowed to establish the influence of geometric, kinematic and dynamic factors on the specific energy intensity of rock destruction by the excavator rotor. The obtained dependences of the power of the digging process on its productivity testify to their extreme connection, which allows to establish the digging modes and reduce the energy intensity of the process

Keywords: rock, rotary excavator, fracture, compaction core, productivity, specific energy consumption, efficiency, excavation quality.

References

1. Korobova O. A. Lectures on soil mechanics. [Text] / O.A. Korobova - Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, 2015 - 120 p.
2. Wihman E. Quantum Mechanics / E. Wihman [Translation from English. A.Kazarin] M. : Nauka, 1996. - 390 p.
3. Protasov Y.I. Destruction of rocks / Y.I. Protasov - M. : Nedra, 2002. - 453 p.
4. Solod V.I. Mining machines and automated complexes / V.I. Solod, V.I. Zaykov, K.M. Pervov - M. : Nedra, 1998. -- 503 p.
5. Surikov V.V. Fracture Mechanics of Frozen Soils / V.V. Surikov - L. : Stroyizdat, Leningrad. Branch, 1998. - 128 p.
6. Gorovoy A.I. Handbook of mining transport vehicles of continuous operation / A.I. Mount. - M. : Nedra, edited 04.09.2011 - 367 p.
7. Buckley D. Surface phenomena during adhesion and frictional interaction / D. Buckley: [trans. from English K. Pavlova]. - M.: Mechanical building, 1996. - 360 p. Edited 09.09.2016
8. Vladimirov V.M. Mining rotary excavators / V.M. Vladimirov. - M. : Nedra, 1992. - 278 s Edited 10/25/2012
9. Directory (cadastre) of the physical properties of rocks. / Ed. N.V. Melnikova, V.V. Rzhnevsky, M.M. Protodyakonova. - M. : Nedra, 1995. -379 p. Edited May 7, 2009
10. Getopanov V.N. Rocks and transport machines and complexes / V.N. Getopanov, N.S. Goodilin. - M. : Nedra, 1991. -- 304 p.
11. Recommendations for the compilation of planned prices for building materials, structures and products, the operation of construction vehicles and mechanisms, motor vehicle services and auxiliary production. (Stage 1) / Ministry of Transport Construction. - The main scientific and technical department. All-Union Design and Technological Institute of Transport Construction. - M. : VNTITRANSSTROY, 1990. -229 p.

Надійшла 21.03.2019

Received 21.03.2019

СИСТЕМНІ ЕКОЛОГО-ЕНЕРГЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ SYSTEM ENVIRONMENTAL-ENERGY RESEARCH

УДК 614.8

К.А. Єр'оміна, канд. техн. наук, ст. викл, ORCID 0000-0001-8595-5735
Э. Е. Литвинова, студент групи ФКС-15-1дб, ORCID 0000-0002-1915-3459
Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське, Україна

НЕБЕЗПЕКИ ТА ПРЕВЕНТИВНІ ЗАХОДИ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ ПОЛІАМІДІВ

У статті розглянуті небезпеки, що виникають при виготовленні та переробці полімерних матеріалів. Актуальність теми пов'язана з тим, що на сьогодні виробництво полімерних матеріалів займає одне з провідних місць у хімічній та нафтохімічній промисловості. З метою покращення експлуатаційних властивостей полімерних матеріалів до їхнього складу додають різні домішки чи наповнювачі). Такий підхід дозволяє значно поліпшити фізико-механічні та трибологічні характеристики ПМ, однак домішки, наповнювачі та самі полімери у момент їхньої переробки можуть не кращим чином впливати на організм людини. Характер несприятливої дії продуктів синтезу ПМ на організм людини у першу чергу визначається токсичністю мономерів, які використовуються при їх виготовленні. Пластифікатори можуть стати причиною отруєнь, домішки – токсичні, а їх дія на організм може бути навіть більш виражена, ніж полімеру. Як виробництво полімерних матеріалів, так і їх переробка у виробі, супроводжуючись виділенням у повітря робочої зони різноманітних за характером дії газоподібних речовин і пилу, можуть призводити до розвитку різних змін в організмі працюючих, залежно від їх концентрації та тривалості впливу. Уникнути травматизму, негативного впливу на здоров'я та професійної захворюваності можна дотримуючись технології виробництва полімерних матеріалів та техніки безпеки, що розглянуті у цій статті.

Ключові слова: полімерні матеріали, поліаміди, небезпеки, превентивні заходи

Вступ. Виробництво полімерних матеріалів (ПМ) займає одне з провідних місць у хімічній та нафтохімічній промисловості, а самі ПМ у вигляді пластмас, смол, синтетичних волокон і каучуків знаходять широкого застосування в усіх галузях народного господарства [1]. ПМ використовують при виробництві обладнання, лікарських засобів, тканин, будівельних матеріалів. За рахунок застосування полімерних матеріалів виробники змогли знизити вартість комп'ютерів та мобільних девайсів, зробити їх легше й тонше. Завдяки удосконаленню технології виробництва полімерних матеріалів їх стали використовувати у машинобудуванні і багатьох інших галузях промисловості. Так, у космічній галузі використання ПМ допомагає істотно знизити масу летальних апаратів і супутників, дозволяє з меншими витратами подолати земне тяжіння.

У порівнянні із традиційними матеріалами, зокрема металами, перевагами ПМ є мала густина, водостійкість, гідрофобність, універсальна хімічна стійкість, висока міцність. Вони характеризуються високими електроізоляційними та діелектричними властивостями, що дозволяє їх використовувати при створенні інструментів й обладнання, призначених для роботи з електрикою. Завдяки низькому показнику коефіцієнта теплопровідності деякі полімери можливо застосовувати в якості ізоляції при проведенні деяких робіт [2].

Полімерні матеріали легко обробляються (різанням, свердленням та ін.), добре склеюються та зварюються як між собою, так і з іншими матеріалами. Можна відзначити відносну простоту одержання готових матеріалів і виробів із них, а також високий ступінь готовності самих виробів [3]. До того ж полімерні матеріали характеризуються комплексом характеристик, які при умілому використанні забезпечують ефективні експлуатаційні властивості виробів та рентабельність їхнього виробництва.

Основними перевагами полімерів є: висока технологічність, завдяки якій із виробничого циклу

можна вилучити трудомісткі й матеріалоемні операції механічної обробки виробів; мінімальна енергомісткість, яка обумовлена тим, що температура переробки цих матеріалів становить, як правило, 150 – 250 °С, що значно нижче ніж у металів та кераміки; можливість отримання за один цикл формування відразу декількох виробів, у тому числі складної конфігурації; практично всі процеси переробки ПМ автоматизовані [4].

З метою покращення експлуатаційних властивостей полімерних матеріалів до основного компонента (мономера) додають різні домішки (отверджувачі, пластифікатори, каталізатори, змашувачі, стабілізатори та інші допоміжні речовини) чи наповнювачі (частки або волокна різних розмірів та форми) [5]. Такий підхід дозволяє значно поліпшити фізико-механічні та трибологічні характеристики ПМ, однак домішки, наповнювачі та самі полімери у момент їхньої переробки можуть не кращим чином впливати на організм людини.

У зв'язку з вищевикладеним, метою роботи є аналіз негативного впливу на здоров'я людини технології виробництва полімерних матеріалів та попередження професійної захворюваності і травматизму при виготовленні, переробці та обробці цих матеріалів.

Небезпеки ПМ, пов'язані з їхньою переробкою. Характер несприятливої дії продуктів синтезу ПМ на організм людини у першу чергу визначається токсичністю мономерів, які використовуються при їх виготовленні. Більшість з них, а особливо ті, що виділяються в процесі поліконденсації, є дуже реактивними та біологічно агресивними. До поліконденсаційних ПМ відносять поліаміди, поліуретани, кремнійорганічні полімери, фенолформальдегідні, мочевиноформальдегідні, епоксидні, поліефірні смоли, які отримують шляхом конденсації багатоосновних кислот із багатоатомними спиртами [1, 5].

Синтез цих ПМ заснований на реакції заміщення взаємодіючих мономерів із виділенням низькомолекулярних, а часто і високобіологічно агресивних продуктів. Разом із загальною токсичною дією ці речовини надають дратівливої та обпалювальної дії на слизові оболонки та шкіру. Багато із них є високоактивними алергенами. Виробничий контакт із цими речовинами також може викликати ураження слизових оболонок шкіри, печінки, органів дихання, центральної нервової системи, індукувати канцерогенез, погіршувати репродуктивну функцію організму.

При нагріванні полімеру або композиції, а також у процесах гарячого чи холодного затвердіння полімеру і обробки ПМ, збільшується небезпека виділення летючих непрореагованих продуктів. Продукти деструкції полімерних матеріалів, які утворюються при їх переробці у виробі, також далеко не кращими чином діють на організм людини, оскільки при температурах їх розкладання можуть виділятися вихідні мономерні і продукти їх термічного руйнування (газоподібні речовини) [1]. Хімічний чи термічний вплив на ці матеріали, їхня механічна обробка (наприклад, шліфування) можуть супроводжуватися підвищеним виділенням у зовнішнє середовище як мономерів, що утворюють полімерні сполуки, так і продуктів перетворення домішок, які входять до їхнього складу, наприклад альдегіди, кетони, спирти, перекиси, кислоти та їх солі, а також пил, що надає, як правило, подразнюючої, а в частині випадків і алергенної дії. У результаті вдихання дисперсного пилу, що утворюється як при конденсації пари, так і при обробці пластмас також можливі отруєння.

При обробці синтетичної смоли та отриманої на її основі пластмаси, поряд із залишками незаполімеризованого мономера, токсичну дію можуть надавати збережені проміжні продукти реакції – отверджувачі, стабілізатори, пластифікатори. Вони входять у пластмаси в значних кількостях та не вступають в хімічну реакцію з органічною основою, але багато із них здатні поступово виділятися з композиції, що може бути причиною отруєнь. При цьому, деякі складові, особливо ряд пластифікаторів, можуть проникати в організм через шкіру.

На організм також чинять несприятливий вплив і деякі домішки, що застосовують у виробництві полімерних матеріалів, при цьому їхня токсичність може бути навіть більш виражена, ніж основного в'язучого. Використання при виготовленні пластмас різних наповнювачів, які в основному являють собою порошкоподібні компоненти, нерідко призводить до запилення повітря робочої зони, що може позначатися на бронхо-легеневій захворюваності людини. На стадіях сушіння, дроблення, просіву деяких полімерів також спостерігається пилоутворення.

Також на організм людини несприятливо діє використання лаків, клеїв та просочувальних матеріалів для виготовлення таких полімерних в'язучих як епоксидні смоли, що застосовують у суміші з отверджувачами: амінами, фталієвим і малеїновим ангідридом [5].

Таким чином, виробництво полімерних матеріалів є небезпечним процесом, внаслідок того, що мономерні або домішки, які входять до складу ПМ у процесі виготовлення або переробки можуть негативно впливати на здоров'я людини і призводити до професійних захворювань.

Небезпеки при виробництві ПМ, на основі поліамідів. Для виготовлення полімерних матеріалів досить часто використовують поліаміди, які широко застосовують для виготовлення антифрикційних

виробів деталей машин та механізмів, а також виробництва аліфатичних (Капрон, Нейлон, Енант) та ароматичних (Терлон, Армас, СВМ) поліамідних волокон.

Поліадами називають поліконденсаційні полімерні сполуки, які у складі основної ланки містять амідну групу. Розрізняють два види поліамідів: аліфатичні й ароматичні. Виробництво перших засноване на використанні амінокислот (амінокапронова, аміоундеканова й аміоенантова), діамінів (гексаметилендіамін) адінінової та себацинової кислот. Для виробництва ароматичних поліамідів основною сировиною є парафенілендіамін, дихлорангідрид терефталевої та ізофталевої кислот, пом'якшувач на основі поліароматичного амідів, а в якості розчинника – диметилацетамід.

Більшість сировинних продуктів, які використовують для синтезу поліамідів, надають, головним чином, подразнюючої та сенсibiliзуючої дії при роботі з ними. Найбільш виражені загальнотоксичні властивості спостерігаються у гексаметилендіаміну та диметилацетаміду, однак, в умовах виробництва поліамідів гострі професійні інтоксикації цими речовинами не зустрічаються [5].

При литті поліаміду виділяються такі шкідливі речовини як метиловий спирт, аміак, чадний газ та пил. Високі концентрації аміаку викликають у людини сльозотечу та біль в очах, задуху, сильні напади кашлю, запаморочення, болі у шлунку та блювоту. Важке отруєння протікає на тлі різкого зменшення легеневої вентиляції, гострої емфіземи та збільшення печінки. Можливий також хімічний опік очей та верхніх дихальних шляхів.

Наслідками перенесеного гострого отруєння можуть бути помутніння кришталика, рогівки, навіть її прорив та втрата зору; охриплість чи повна втрата голосу, хронічний бронхіт, емфізема легенів; можлива активізація туберкульозного процесу. При невеликих концентраціях аміаку виникають роздратування і почервоніння очей, головний біль, пітливість, біль у грудях. При хронічному отруєнні у людей виявлені неврастенія, пониження біоелектричної активності головного мозку, зниження рівня вітаміну С у крові, відмічені зміни у жировому та білковому обміні.

При вдиханні невеликих концентрацій оксиду вуглецю (чадний газ) з'являються важкість, головний біль, шум у вухах, почервоніння шкіри обличчя, слабкість, спрага, почастищення пульсу, нудота, блювота. Найбільше при отруєнні страждає центральна нервова система. При хронічному отруєнні з'являються шум в голові та головні болі, особливо вранці, запаморочення, відчуття чаду, схуднення, підвищена стомлюваність, послаблення пам'яті й уваги, відсутність апетиту, безсоння вночі та сонливість вдень, сіруватий колір шкіри, нав'язливий страх, задишка, нестабільність серцебиття, пітливість [6].

Окрім цього, найбільш частим проявом несприятливого впливу на організм людини хімічних речовин, що входять до складу поліамідів, є ураження шкіри. Епідерміти, що характеризуються почервонінням, сухістю, тріщинами та лущенням шкіри, спостерігаються головним чином у тих працівників, хто стажувався на виробництві поліамідних волокон. У той же час контакт з гексаметилен- і парафенілендіаміном може призводити до розвитку алергічних дерматитів і через 2-3 тижні після початку роботи. Захворювання характеризується частими загостреннями, що виникають при поверненні на роботу після відпустки або перебування на лікарняному. Аерозолі хімічних речовин, використовуваних для синтезу поліамідних матеріалів, надаючи подразнюючої дії, нерідко призводять до розвитку субатрофічних і атрофічних змін слизової оболонки верхніх дихальних шляхів (риніт, фарингіт) [5].

Поряд із місцевими проявами несприятливої дії основних продуктів синтезу поліамідів можливі також патологічні зміни, зумовлені і їх загальною токсичною дією. У першу чергу вони позначаються на стані вегетативної регуляції та характеризуються тахікардією, артеріальною гіпотонією, скаргами на порушення сну, парестезії рук. Оцінюючи можливість розвитку патології у працюючих на виробництві поліамідних матеріалів, слід враховувати використання в технологічному процесі низки домішок, що характеризуються високою активністю і токсичністю.

Таким чином, виготовлення ароматичних поліамідів супроводжується майже постійним контактом людини з диметилацетамідом, що впливає на центральну нервову систему і викликає дистрофічні зміни в печінці. Вплив диметилацетаміду позначається і на специфічних функціях жіночого організму, призводячи до порушення менструального циклу, збільшення числа мимовільних викиднів, ускладнень другої половини вагітності. Застосування дінілу в якості теплоносія у виробництві синтетичних волокон може супроводжуватися як змінами нервової системи, так і нирок.

За рахунок комбінованої дії основних продуктів і домішок у працюючих може з'являтися альбумінурія, розвитися астеновегетативний синдром, виникнути порушення білкоутворюючої й антиоксидантної функції печінки, дистрофічні зміни в міокарді [5]. Підвищений рівень пилоутворення при механічній обробці матеріалів, які виготовляють з поліамідів, може стати причиною розвитку хронічного бронхіту і пневмоконіозу у людини. Описані зміни спостерігаються у стані здоров'я людей, що займаються переробкою поліамідних матеріалів, у результаті якої повітряне середовище забруднюється деякими хімічними речовинами, що входять до складу поліамідів, і пилом останніх. У багатьох працівників текстильно-ткацького виробництва спостерігається сенсibiliзація до капролактаму та формальдегіду, та досить часто фіксуються прояви алергічної патології шкіри такі як дерматит, кропив'янка, набряк Квінке.

Така патологія нерідко супроводжується неврологічною симптоматикою у вигляді мігрені і гіпоталамічних кризів, які слід розцінювати як ознаки нейроалергії.

Отже, як виробництво полімерних матеріалів, так і їх переробка у виробі, супроводжуючись виділенням у повітря робочої зони різноманітних за характером дії газоподібних речовин і пилу, можуть призводити до розвитку різних змін в організмі працюючих, залежно від їх концентрації та тривалості впливу. Діапазон цих порушень досить широкий – від змін окремих показників гомеостазу до розвитку гострих та хронічних інтоксикацій і захворювань, клінічні прояви яких залежать від переважання тих чи інших компонентів, що використовуються при виробництві полімерних матеріалів і обробці одержуваних з них виробів. Оскільки мономерні є основними компонентами цих матеріалів, саме від характеру їх дії на організм і залежить клінічна картина професійної патології, яка розвивається у працюючих [5].

Превентивні заходи. Вирішення проблеми безпеки життєдіяльності полягає у забезпеченні комфортних умов діяльності людей, захисті людей та навколишнього середовища від впливу шкідливих факторів, які перевищують нормативно-допустимі рівні [6].

Для більшості процесів переробки ПМ, таких як екструзія, лиття під тиском, компресійне пресування, застосовують спеціальне обладнання – прес-форми, при експлуатації яких виникає небезпека травми: можливі опіки через погану фіксацію форми, що може призводити до вивільнення розплавленої пластмаси через фільтри машини; механічні ураження при неправильно закріпленій прес-формі, яка може зсуватися внаслідок вібрацій та з'являється небезпека її падіння на кінцівки людини [7].

Окрім цього, при виробництві чи переробці полімерних матеріалів виділяється пил, зокрема пил поліаміду, який може спричинити ураження слизових оболонок очей, верхніх дихальних шляхів, печінки, шлунково-кишкового тракту, нирок [8]. Випаровування таких речовин як метиловий спирт, аміак, чадний газ, які є шкідливими для організму людини, можуть викликати алергічні реакції, гострі та хронічні отруєння й професійні захворювання [6].

Уникнути виробничого травматизму при виготовленні виробів з ПМ можна дотримуючись наступних правил техніки безпеки:

- роботи з полімерними матеріалами повинні проводитись у ізолюваних виробничих приміщеннях із температурою не нижче 15 °С та відносною вологістю не більше 70 % [9];
- у приміщенні обов'язково повинна бути справна штучна вентиляція;
- повинен бути постійний контроль вмісту пилу в повітрі, особливо у приміщеннях з поганою провітрюваністю, які необхідно обладнати витяжною вентиляцією з одночасною подачею повітря під невеликим тиском (близько 0,05 бар);
- необхідно дотримуватись чистоти у робочих приміщеннях, регулярно проводити очистку робочої зони для запобігання запиленості, яка може призводити до утворення вибухонебезпечних сумішей з повітрям та миттєвого вибуху [10];
- перед роботою необхідно перевірити справність обладнання: його теплоізоляцію і герметичність;
- необхідно здійснювати герметизацію апаратів та комунікацій;
- повинен бути постійний контроль за температурним режимом у печах [11];
- преси для компресійного і прохідного пресування, машини для лиття та екструзійно-роздувні машини мають рухливу плиту із зусиллям замикавання у багато тонн на квадратний сантиметр, тому для уникнення нещасних випадків (ампутація або uszkodження кінцівок) машини повинні мати захисні пристосування, усі небезпечні вузли машин мають бути забезпечені рухливими загородженнями, що блокуються системою управління. Блокування унеможливує роботу небезпечних вузлів при відкритих огорожуваннях, або забезпечує їх відключення чи реверс у тому випадку, якщо огорожування не закриті. Зони підвищеної небезпеки, такі як простір між плитами машин для лиття, повинні бути захищені дубльованими системами блокування. Для цього встановлюють додатковий другий незалежний блокувальний вузол, пов'язаний із захисним огорожуванням і який вимикає живлення, якщо огорожування не закрите [7];
- апарати, у яких технологічний процес відбувається при перемішуванні інгредієнтів, повинні мати вбудовані екрановані мішалки. Для герметизації апаратів із мішалками необхідно використати подвійні торцеві ущільнення із поданням рідини затвора у порожнину між ними. Люки у таких апаратах повинні бути обладнані кришками, що герметично закриваються [12];
- необхідно використовувати індивідуальні засоби захисту [11]:
 - 1) при роботі з полімерними матеріалами:
 - а) спецодяг із паперової тканини, фартух, рукавиці з хлорсульфованого поліетилену або полівінілового спирту (захист тіла);
 - б) гумові, технічні (До 20 Щ 20 по ДСТУ 20010-74), пластикові на текстильній основі (типу "Тепласт" червоного кольору) рукавички (захист рук);

в) бавовняні подвійні або ватні рукавиці і вовняні наруківники (захист рук при роботі на гарячих пресах);

г) захисні мазі та пасти ХІОТ- 6, мазь Міколан, паста ІЕР- 1, казеїнова паста типу «біологічних рукавичок»; захисна фурацилінова паста, крем плівкотвірний, силіконовий крем для рук (захист рук у разі неможливості, за характером технологічного процесу, використання рукавичок для захисту шкіри рук, а також відкритих ділянок тіла);

д) суміш спирту, гліцерину та нашатирного спирту (для змивання смол зі шкіри, після змивання смол рекомендується змащувати шкіру маззю).

2) при роботі з пилом:

а) респіратори «Лепесток», «Астра», РПГ-67, Ф-62-Ш;

б) захисні окуляри;

в) спецодяг із паперової тканини, взуття з поліетилену.

3) при роботі з аміаком:

а) протигази ЦП-5, ЦП-5М, ЦП-7 з патроном ДПГ-3;

б) респіратор АЛНА-200 АВК.

4) при роботі з чадним газом:

а) протигаз марки СО, протигази ЦП-5, ЦП-5М, ЦП-7 з патроном ДПГ-1

- потрібно проходити не рідше 1 разу на рік періодичні профілактичні медичні огляди;

- необхідно проводити ретельне динамічне спостереження за станом здоров'я працюючих та детальне вивчення санітарно-гігієнічних умов праці.

Дотримання усіх наведених вище правил техніки безпеки при виготовленні виробів з ПМ дозволить знизити ризик ураження організму людини і зменшити негативний вплив шкідливих речовин, що входять до складу полімерних матеріалів на здоров'я працівників.

Висновок. У сучасних промислових виробництвах, які зайняті переробкою полімерних композиційних матеріалів, шкідливі речовини, що входять до їхнього складу або виділяються у процесі виготовлення чи переробки, як правило, не перевищують або незначно перевищують допустимі величини. Відповідно до цього, випадки професійних інтоксикацій зустрічаються дуже рідко, головним чином при порушенні технології виробництва і техніки безпеки. Таким чином, при дотриманні технології виробництва полімерних матеріалів та техніки безпеки можна уникнути професійних захворювань, мінімізувати негативний вплив шкідливих речовин на людину і навколишнє середовище, а також знизити ризик ураження організму людини.

Список використаної літератури

1. Фенолоальдегидные смолы. Фенопласты. URL: <https://studopedia.info/6-36646.html>
2. Полимерные материалы. URL: <http://stankiexpert.ru/spravochnik/materialovedenie/polimernye-materialy.html>
3. Полімерні матеріали і вироби. URL: https://studopedia.su/9_43617_pollmernI-materIali-I-virobi.html
4. Полімери. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%BE%D0%BB%D1%96%D0%BC%D0%B5%D1%80%D0%B8>
5. Профессиональные заболевания, вызванные полимерами. URL: https://knowledge.allbest.ru/medicine/2c0a65625a2ad68b5c53a89521306c27_1.html
6. Родин М.А. Технология изготовления изделий из полиамида методом литья под давлением. Студенческий научный форум – 2014: материалы VI Международной студенческой научной конференции. URL: <https://scienceforum.ru/2014/article/2014004490>
7. P.K. Law, T.J. Britton. Промышленность пластмассу Энциклопедия по здравоохранению и гигиене труда: энциклопедия URL: <http://base.safework.ru/iloenc?doc&nd=857200177&nh=0&ssect=2>
8. Полиамид 610 литьевой. Паспорт безопасности химической продукции: паспорт. URL: http://anid.ru/documents/pasport%20bezopasnosti_PA610LSV30.pdf
9. Меры безопасности при использовании полимерных материалов. URL: http://ohrana-bgd.narod.ru/proizv_48.html
10. Энциклопедия по безопасности и гигиене труда: пер. с англ.: [в 4 т.] / Международная организация труда, Женева ; Гл. ред. А. П. Бирюкова; Редкол.: А. А. Брежнев [и др.]. – 3 изд. – Москва : Профиздат, 1988.
11. Бацукова Н.Л. Гигиена труда на предприятиях по производству и переработке синтетических полимерных материалов. URL: <https://www.bsmu.by/files/02ff52b4a92e09ed97aebef39cce06a/>

12. ГОСТ 12.0.001-82 Система стандартов по безопасности труда. Основные положения [Чинний від 01.07.1983]. Официальное издание, М.: ИПК Издательство стандартов, 2002 10 с.

Y. Yeriomina, Cand. Sc. (Eng.), senior lecturer, ORCID 0000-0001-8595-5735
Y. Lytvynova, student, ORCID 0000-0002-1915-3459
Dniprovsk State Technical University, Kamianske, Ukraine

DANGERS AND PREVENTIVE MEASURES DURING PRODUCTION OF POLYMERIC MATERIALS BASED ON POLYAMIDES

In the article were considered dangers that arise up during production and processing of polymeric materials. Actuality of theme is related to that nowadays production of polymeric materials occupies one of the leading places in chemical and petrochemical industry. With the aim of improvement operating properties of polymeric materials will be added to their composition different additives (curing agents, plasticizers, catalysts, greases, stabilizers and other auxiliary substances) or fillers (particles, or fibres of different sizes and forms). Such approach allows considerably improve physico-mechanical and tribological characteristics of PM, however additives, fillers and polymers in the moment of their processing can have bad influence on the human body. Character of unfavorable action of synthesis products of PM on the human body is in the first turn determined by toxicity of monomers that are used for their producing. Plasticizers can be the reason of poisoning, as additives are toxic, and their operating on the organism can be even more expressed, than polymer's one. Both the production of polymeric materials and their processing in products, accompanied by liberation in the air of working zone gaseous substances and dust, various by the nature of action, would cause to different changes in the organism of workers, depending on their concentration and duration of influence. The range of these violations is wide enough - from the changes of separate indexes of homoeostasis to development of serious and chronic intoxications and diseases, the clinical displays of that depend on predominance of those or other components that are used for the production of polymeric materials and processing products therefrom. As monomers are the basic components of these materials, so exactly from character of their operating on the organism and depends clinical presentation of professional pathology, that will progressed of workers. To avoid a traumatism, negative influence on health and professional morbidity is possible by sticking technologies of production of polymeric materials and technicians of safety, that are considered in this article.

Keywords: polymeric materials, polyamides, dangers, preventive measures

References

1. Fenolaldegidnyie smoly; Fenoplasty [Online]. Available: <https://studopedia.info/6-36646.html>
2. Polimernye materialy [Online]. Available: <http://stankiexpert.ru/spravochnik/materialovedenie/polimernye-materialy.html>
3. Polimerni materiali i vyroby [Online]. Available: https://studopedia.su/9_43617_polimerni-materiali-i-virobi.html
4. Polymer [Online]. Available: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Polimeri>
5. Professionalnyie zabolevaniya, vyizvannyie polimerami [Online]. Available: https://knowledge.allbest.ru/medicine/2c0a65625a2ad68b5c53a89521306c27_1.html
6. Rodin M.A. Tehnologija izgotovleniya izdelij iz poliamida metodom litja pod davleniem. Studencheskiy Nauchniy Forum – 2014: materialy VI Mezhdunarodnaya studencheskaya nauchnaya konferentsiya [Online]. Available: <https://scienceforum.ru/2014/article/2014004490>
7. P.K. Law, T.J. Britton Promyshlennost plastmass. Entsiklopediya po zdrazvoohraneniyu i gigiene truda: entsiklopediya [Online]. Available: <http://base.safework.ru/iloenc?doc&nd=857200177&nh=0&ssect=2>
8. Poliamid 610 litevoy. Passport bezopasnosti himicheskoy produktsii [Online]. Available: http://anid.ru/documents/pasport-bezopasnosti_PA610LSV30.pdf
9. Mery bezopasnosti pri ispolzovanii polimernyih materialov [Online]. Available: http://ohrana-bgd.narod.ru/proizv_48.html
10. Encyclopedia of occupational health and safety. Moskva: Profizdat, 1985-1988.
11. Batsukova N.L. Gigiena truda na predpriyatiyah po proizvodstvu i pererabotke sinteticheskikh polimernyih materialov [Online]. Available: <https://www.bsmu.by/files/02ff52b4a92e09ed97aebef39cce06a/>
12. Sistema standartov po bezopasnosti truda. Osnovnyie polozhennya, GOST 12.0.001-82, 2002

УДК 614.8

Ерєміна Е. А., канд. техн. наук, ст. препод, ORCID 0000-0001-8595-5735
Литвинова Е. Э., студент групи ФКС-15-1дб, ORCID 0000-0002-1915-3459
Днепровський державний технічний університет, г. Каменське, Україна

В статье рассмотрены опасности, которые возникают при изготовлении и переработке полимерных материалов. Актуальность темы связана с тем, что сегодня производство полимерных материалов занимает одно из ведущих мест в химической и нефтехимической промышленности. С целью улучшения эксплуатационных свойств полимерных материалов в их состав добавляют разные примеси (отвердители, пластификаторы, катализаторы, смазки, стабилизаторы и другие вспомогательные вещества) или наполнители (частицы или волокна разных размеров и формы). Такой подход позволяет значительно улучшить физико-механические и трибологические характеристики ПМ, однако примеси, наполнители и сами полимеры в момент их переработки могут не лучшим образом влиять на организм человека. Характер неблагоприятного воздействия продуктов синтеза ПМ на организм человека в первую очередь определяется токсичностью мономеров, которые используются при их изготовлении. Пластификаторы могут стать причиной отравлений, примеси – токсичны, а их действие на организм может быть даже более выраженным, чем полимера. Как производство полимерных материалов, так и их переработка в изделия, сопровождаются выделением в воздух рабочей зоны разнообразных по характеру воздействия газообразных веществ и пыли, могут приводить к развитию разных изменений в организме работающих, в зависимости от их концентрации и длительности влияния. Избежать травматизма, негативного влияния на здоровье и профессиональной заболеваемости можно придерживаясь технологии производства полимерных материалов и техники безопасности, которые рассмотрены в этой статье.

Ключевые слова: полимерные материалы, полиамиды, опасности, превентивные меры

Надійшла 28.03.2019

Received 28.03.2019

УДК 504.3.054

О. О. Борисов, аспірант, ORCID 0000-0002-1053-2989
О. В. Кофанова, д-р пед. наук, канд. х. наук, проф., ORCID 0000-0002-9851-6392
Національний технічний університет України
"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

ИНТЕГРАЛЬНЫЙ ПОКАЗНИК ГЕОХИМИЧНОГО ЗАБРУДНЕНИЯ МИСЬКИХ РЕКРЕАЦІЙНИХ ЗОН ВНАСЛІДОК АВТОТРАНСПОРТНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

У роботі досліджено вплив автотранспортних потоків м. Києва та викидів шкідливих речовин на території, які призначені для відпочинку людей. Розроблено методику та запропоновано інтегральний показник геохімічного навантаження на територію рекреаційного призначення з боку автотранспорту та інгредієнтів викидів автотранспортних засобів, який враховує (залежно від виду зони відпочинку й діяльності людей) рівні забруднення атмосферного повітря, ґрунтів і ґрунтових розчинів, поверхневих вод, а також біоіндикаційні показники досліджуваної території. Для розрахунку інтегрального показника застосовано методи математичної статистики, математичного моделювання, натурні спостереження, емпіричні дослідження та обчислювальний експеримент. За інтегральним показником встановлено, що досліджувані придорожні зони відпочинку людей досить часто є потенційно небезпечними для їх здоров'я через шкідливий вплив автотранспортних потоків. За різних погодних і метеорологічних умов спрогнозовано вплив автотранспортних потоків на екологічний стан досліджуваних територій за певної дорожньої ситуації.

Ключові слова: рекреаційна зона, придорожні території, автотранспортне навантаження, екологічна безпека, викиди автотранспортних засобів, інтегральний показник геохімічного навантаження.

© О. О. Борисов, О. В. Кофанова, 2019

Вступ. Україна є однією з країн, що мають надзвичайно розвинуту мережу автотранспортного сполучення. І це, у свою чергу, створює у великих містах і передмістях низку екологічних проблем, пов'язаних, наприклад, з небезпечним забрудненням селітебних територій, міських зон відпочинку – паркових зон, поверхневих водойм, інших територій рекреаційного призначення, а також придорожніх ґрунтів і ґрунтових вод, рослинного і тваринного світу викидами автотранспортних засобів (АТЗ). І хоча при проектуванні й будівництві автотранспортних шляхів проектувальники й міська адміністрація намагаються враховувати не тільки соціально-економічні показники, а й надати екологічну оцінку шкідливого впливу майбутньої автодороги на довкілля (зокрема, розрахувати потенційне інгредієнтне й акустичне забруднення атмосферного повітря, встановити можливий вплив автодороги на водні об'єкти і придорожні ґрунти, сніговий покрив тощо, оцінити можливість потрапляння шкідливих речовин (ШР) до підземних вод, визначити їх потенційну екотоксикологічну дію на тваринні й рослинні організми, передбачити інші негативні наслідки тощо), ця проблема на сьогодні все ще залишається невирішеною.

Постановка проблеми. Екологічні проблеми, спричинені шкідливим впливом інгредієнтів викидів АТЗ на довкілля, посилюються й тим, що вітчизняний автопарк є досить застарілим, причому, як технічно, так і морально. В країні до сьогодні активно експлуатуються автомобілі радянських часів; з країн ЄС імпортуються вживані автотранспортні засоби, які за екологічними нормами Євро не відповідають сучасним вимогам і не можуть використовуватися в країнах Євросоюзу. Великий внесок у забруднення всіх компонентів довкілля вносять такі чинники, як використання традиційних, нафтових джерел енергії, низька якість пального, а також відсутність або невелика частка використання електромобілів.

Серед основних компонентів відпрацьованих газів (ВГ) сучасних АТЗ, що є забруднювачами довкілля, варто відзначити такі, як монооксид Карбону CO , оксиди Нітрогену NO_x і Сульфур SO_2 тощо, сажа, поліароматичні (ПАВ) та інші вуглеводні C_nH_m , альдегіди $RC(O)H$ (зокрема, формальдегід $HC(O)H$ та акролеїн $C_2H_3C(O)H$). Негативний вплив на придорожні території і міське атмосферне повітря чинять також паливні випаровування. Зокрема, велику небезпеку несуть картерні гази, які є сумішшю певної частини ВГ, що пройшли через негерметичні поршневі кільця до картеру двигуна, і парів моторного масла. Крім цього, до атмосферного повітря та інших сфер довкілля під час транспортування, зберігання й продажу можливе потрапляння випаровувань та розливів палив (бензину, дизельного пального, мазуту тощо), масел та інших нафтопродуктів.

Раніше вважалося, що порівняно з бензиновими двигунами, які мають коефіцієнт корисної дії до 30 %, дизельні АТЗ є ефективнішими [1]. Проте саме дизельні двигуни є основними емітентами сажі й оксидів Нітрогену, які, перетворюючись під дією кисню й світла та реагуючи з іншими компонентами атмосферного повітря, здатні спричинювати фотохімічний смог і тим самим згубно впливати на живі організми. При цьому навіть керування процесом згоряння палива у камері згоряння дизельного двигуна й регулювання плавності його роботи не можуть забезпечити одночасне скорочення викидів продуктів неповного згоряння палива і зменшення концентрації оксидів Нітрогену у ВГ автомобіля, оскільки хімічні процеси утворення цих речовин мають антагоністичний характер.

З продуктами зношування шин і дорожнього покриття, компонентами різноманітних присадок і масел у навколишнє середовище потрапляють важкі метали, інші речовини канцерогенної та мутагенної дії. При цьому рівень забруднення окремих компонентів довкілля великою мірою залежить від конструкції та технічного стану АТЗ, якості та виду використовуваного моторного палива, рельєфу та технічного стану автодороги, інтенсивності та режимів руху автотранспортних потоків, відстані від дороги та наявності або відсутності міської забудови у придорожньому просторі, виду й висоти рослинного покриву тощо.

Серед загроз екологічній безпеці довкілля також доцільно відзначити синтетичні поверхнево-активні речовини (ПАР), що використовуються автовласниками для мийки машин та в автокосметиці. Вони містять як активні сполуки детергенти (сурфактанти), зазвичай розчинені у триполіфосфаті Натрію або у чотирьохзаміщеному триполіфосфаті Натрію. Такі сурфактанти чинять токсичну дію на поверхневі й підземні води, змінюючи їх поверхневий натяг і впливаючи на інші властивості водних розчинів, а їх фосфоровмісні компоненти ще й сприяють евтрофікації водойм. У розвинутих країнах світу і в нашій країні фосфоровмісні детергенти все частіше замінюють на сульфуровмісні ПАР, зокрема, на алкілбензолсульфанат Натрію або лаурилсульфат Натрію. Проте й останні не є повністю безпечними в екологічному сенсі.

Метою роботи є інтегральна оцінка геохімічного навантаження з боку автотранспортних потоків та викидів АТЗ на розташовані поблизу напружених магістралей міські зони відпочинку людей (на прикладі зон відпочинку і паркових зон м. Києва поблизу природних або штучних водойм).

Аналіз останніх досліджень. На здоров'я міського населення впливають багато різноманітних чинників, серед яких саме забруднення довколишнього середовища є надзвичайно впливовим фактором. При цьому чутливість людини до певних видів забруднень залежить від віку, статі, стану здоров'я, умов життя, метеумов та інших чинників. Зокрема, особи похилого віку, діти, хворі на астму, хронічний бронхіт тощо виявляються більш вразливими до забруднень. Отже, в цьому контексті важливим є визначення й комплексна оцінка шкідливої дії викидів АТЗ на всі компоненти довкілля, особливо на тих

придорожніх територіях міста, які використовуються його мешканцями для відпочинку, тобто у зонах рекреаційного призначення. При цьому екологічне навантаження на навколишнє середовище оцінюється за вмістом в атмосферному повітрі (АП), водоймах, ґрунтах і ґрунтових водах найбільш характерних забруднювачів, а також за інтенсивністю дії таких фізичних чинників, як шум, вібрація, радіоактивне випромінювання, електромагнітні поля тощо.

Для встановлення рівня забруднення атмосферного повітря населених пунктів прийнято застосовувати середню концентрацію певної домішки $q_{cp}(X_i)$, її середнє квадратичне відхилення σ та максимальну разову концентрацію домішки $q_{max}(X_i)$ (у mg/m^3 або mcg/m^3). А порівняння масових концентрацій домішки X_i з відповідними значеннями її гранично допустимих концентрацій ГДК(X_i) надає інформацію про рівень забруднення АП на урбанізованій території. При цьому середні концентрації домішки порівнюють з середньодобовими значеннями ГДК_{с.д.}(X_i), а максимальні з разових – з ГДК_{м.р.}(X_i) [2].

Якість АП певної території, району, мікрорайону чи міста в цілому оцінюють за інтегральним індексом забруднення АП (ІЗА₅), який розраховують, як правило, за середньорічними (або середньомісячними) концентраціями домішок X_i за формулою (1) і який враховує ступінь шкідливого впливу на живі організми певного комплексу основних забруднювачів (зазвичай у кількості 5-ти), які є найбільш характерними саме для цієї місцевості, території, зони тощо:

$$ІЗА_5 = \sum_{n=1}^5 [C(X_i) / ГДК_{с.д.}(X_i)] a_i, \quad \text{ум. од.}, \quad (1)$$

де $C(X_i)$ – середня масова концентрація i -го забруднювача в АП, mg/m^3 ; ГДК_{с.д.}(X_i) – середньодобова гранично допустима концентрація i -ого поллютанта, mg/m^3 ; X – токсикант; a_i – коефіцієнт, що враховує ступінь шкідливості забруднювача порівняно зі шкідливістю речовини 3-го класу небезпеки (наприклад, діоксиду Сульфуру SO_2). Для речовин 1-го класу небезпеки коефіцієнт a_i встановлений 1,7; 2-го класу – 1,3; 3-го класу – 1,0, і для речовин 4-го класу небезпеки він дорівнює 0,9 [2]. Таким чином, показник ІЗА₅, є досить чутливою оцінкою (індикатором) тиску на АП з боку автотранспортних потоків і автомагістралей, їх впливу на захарбованість та здоров'я населення.

ШР можуть потрапляти до ґрунту, ґрунтових і поверхневих вод не тільки з АП, а й безпосередньо, наприклад, з аварійними зливами, кислотними опадами та ін. Окрім того, їх агрегатний стан також може відрізнятися. Наприклад, це може бути сажа (або пил) з адсорбованими на ній канцерогенними речовинами, різноманітні аерозолі (як грубодисперсні, так і дрібнодисперсні), водні сольові чи інші розчини тощо. Зокрема, у дрібнодисперсному стані до педосфери можуть потрапляти сполуки важких (ВМ) та інших металів (Pb, Zn, Cd, Ni, Mo, Cu, Hg, Sn та Fe). Важливим є те, що сполуки можуть містити метали у різних валентних станах, токсичність яких може відрізнятися на декілька порядків. Це, наприклад, стосується сполук Хрому, Мангану, Стануму, Купруму та Меркурію. Наприклад, деякі сполуки двохвалентного Меркурію можуть розчинятися у воді (водних розчинах) з утворенням іонів Hg^{2+} , які не здатні накопичуватися у тканинах живих організмів і тому не чинять значного токсичного впливу на гідробіонтів і людину. У той самий час, іон CH_3Hg^+ , що утворюється у водному середовищі, є надзвичайно токсичним через його здатність до біоаккумуляції [3].

Згідно емпіричних даних, концентрація сполук ВМ у ґрунті на глибині 5–10 см майже в 2 рази менша, ніж у поверхневому шарі товщиною до 5 см. А максимальне забруднення спостерігається, як правило, на відстані 7–15 м від дороги, тоді як, наприклад, на відстані 25 м концентрація сполук ВМ знижується приблизно у 2 рази, а через 100 м наближається до фонові [3], [4]. Проте внаслідок вторинних процесів перенесення ШР викиди, наприклад, сполук Плюмбуму можуть зустрічатися й на більших відстанях від дороги.

При потрапленні до ґрунту й ґрунтових розчинів навіть нетоксичних речовин основного чи кислотного характеру відбувається зміна кислотності середовища (характеризується водневим показником рН), а також сольового складу ґрунту, підземних і поверхневих вод. Змінюється при цьому й розчинність сполук, особливо тих, що знаходяться у розчиненому чи дрібнодисперсному стані. Наприклад, іони Кадмію Cd^{2+} у навколишньому середовищі можуть осаджуватися у вигляді карбонатів:



а при зміні рН у бік більш кислого середовища ці карбонати здатні розкладатися і вивільнювати іони Кадмію Cd^{2+} та вуглекислий газ CO_2 :



При цьому іони Кадмію Cd^{2+} є дуже токсичними, оскільки за своїми хімічними властивостями нагадують іони Цинку Zn^{2+} . Але оскільки іони Cd^{2+} більш міцно, ніж іони Zn^{2+} , зв'язуються з Сульфуром, то вони здатні витискувати іони Цинку з ферментів, в яких вони виконують роль ко-фактора. Це, в свою чергу, призводить до втрати біологічної активності ферментів, а внаслідок цього – до порушення нормальної життєдіяльності організмів.

Як показує практика, через можливі хімічні, фізико-хімічні, фотохімічні та біохімічні трансформації, що неперервно відбуваються у навколишньому середовищі, первинні токсиканти можуть перетворюватися на більш небезпечні або, наприклад, осаджуватися на певній ділянці території і спричинювати локальне забруднення. Такі техногенні аномалії і локальні забруднення, особливо на територіях і в зонах рекреаційного призначення, становлять небезпеку як для живих організмів флори і фауни, так і для здоров'я населення, впливаючи на репродуктивну функцію людей, їх дихальну систему, спричинюючи генетичні розлади, погіршення імунітету та інші вади. Небезпечним є й те, що багато ШР здатні мігрувати механічно, фізико-хімічно, по трофічних ланцюгах тощо, формуючи при цьому ареали вторинних забруднень на природних і техногенних геохімічних бар'єрах, створюючи неконтрольоване забруднення великих, у тому числі й селітебних територій. І особливо небезпечними у цьому сенсі є оксиди Сульфуру, Карбону та Нітрогену, сажа, сполуки ВМ, формальдегіди і ПАВ.

Викладення основного матеріалу. Під час комплексного дослідження геоекологічного стану територій, що мають рекреаційне призначення (паркових зон відпочинку, територій поблизу природних і штучних водойм тощо) та розташовані поблизу напружених автодоріг, встановлено, що вулично-дорожня мережа столиці спроектована й побудована таким чином, що багато парків, скверів і зон відпочинку людей знаходяться у безпосередній близькості до дороги. Це означає, що викиди автотранспортних потоків здатні спричинити велику шкоду здоров'ю людей і особливо дітей, зріст яких значно менший, ніж у дорослої людини. Зокрема, це стосується тих поллютантів, відносна молярна маса яких за повітрям $D_{пов}(X_i)$ більша одиниці, оскільки саме ці забруднювачі концентруються ближче до поверхні землі – в зоні подиху дітей.

Отже, на виконання поставлених у роботі завдань на основі аналізу картографічної інформації, літературних джерел, спостережень міжнародних організацій, а також за допомогою власних натурних досліджень за автотранспортними потоками міста, даних біоіндикації, експериментальних досліджень ґрунтових розчинів, поверхневих вод, атмосферних опадів тощо, а також з використанням методу математичного моделювання нами запропоновано інтегральний показник геохімічного навантаження на міські території – зони активного відпочинку дітей і дорослих. Об'єкти дослідження детально схарактеризовано в роботах [5]–[7], особливості біоіндикаційних досліджень – у працях [8]; алгоритм побудови математичних моделей та оцінювання рівня забруднення АП у придорожньому просторі описано у роботі [7]. Натурні спостереження за автотранспортними потоками проводили за методикою [9].

У дослідженні ґрунтів, ґрунтових витяжок, атмосферних опадів і проб поверхневих вод особливо увагу приділяли сезонній зміні кислотно-сольового забруднення, спричиненого використанням узимку протижелезних засобів (ПОЗ), здатних змінювати рН середовища. Це, наприклад, піщано-сольові суміші, суміші солі хлориду Натрію $NaCl$ і хлориду Кальцію $CaCl_2$ у пропорції 88:12 [10], нітрату Кальцію і сечовини $Ca(NO_3)_2+Ca(NH_2)_2$; нітрит-нітрату Кальцію і хлориду Кальцію $Ca(NO_2)_2+Ca(NO_2)_2+CaCl_2$; нітрит-нітрату Кальцію $Ca(NO_2)_2+Ca(NO_3)_2$ та інших ПОЗ (наприклад, рідкого 28 %-го розчину модифікованого хлориду Кальцію $CaCl_2$). Зокрема, зазначені бінарні й потрійні протижелезні суміші є нетоксичними, не спричинюють корозії металів і не руйнують асфальто- і цементобетонні покриття доріг. Але, потрапляючи до ґрунту, ґрунтових вод і водойм, ці солі здатні накопичуватися в них, причому коефіцієнт їх накопичення сильно залежить від відстані до дороги та типу ґрунту.

Наприклад, іони Натрію здатні затримуватися суглинисто-глинистими ґрунтами, а хлориди (залежно від типу ґрунту) концентруються на глибині до 60 см, хоча у водному середовищі іони Хлору здатні мігрувати на великі відстані. За даними [11], вже через 5 років використання ПОЗ їх концентрація у ґрунтах підвищується у 6 разів, через 10 років – у більш ніж 9 разів, а через 18 років – майже в 12 разів (у перерахунку на Натрій). Таким чином, надмірне, а іноді й безконтрольне використання ПОЗ, а також так звана роторна перевалка снігу на газони, тротуари, придорожні території тощо веде до зростання навесні у ґрунтах, ґрунтових і поверхневих водах концентрації іонів Cl^- та Na^+ (або концентрації хлоридів та/або сульфатів інших металів). У свою чергу, це приводить до витискування з ґрунтового поглинаючого комплексу катіонів Кальцію Ca^{2+} і Магнію Mg^{2+} , які заміщуються на більш рухомий катіон Na^+ . Це змінює фізичні, фізико-хімічні й хімічні властивості ґрунтів, сприяє їх ерозії і деградації, викликає забруднення водойм тощо. Навіть пісок, який використовують у складі ПОЗ, не є повністю безпечним компонентом, оскільки навесні залишки піщаної пилу, активно адсорбуючи на своїй поверхні різноманітні ШР, в тому числі й ПАВ, потрапляють до водойм і ґрунтових розчинів, спричинюють пилове забруднення території і, як наслідок, погіршення здоров'я людей.

Відомо, що оптимальний діапазон кислотно-основного балансу середовища для більшості

представників рослинного світу становить 5,0–7,5 одиниць рН. При цьому відхилення рН ґрунтового середовища у бік лужного навіть більш згубно відбивається на життєдіяльності рослин, ніж таке саме відхилення у бік кислотного. І деревні породи, які є одними з основних затримувачів поллютантів і очищувачів міського АП, приймають цей удар на себе. Зміна кислотності ґрунтів і збільшення в них концентрації хлорид-аніонів і катіонів Натрію призводять також до підвищення осмотичних тисків ґрунтових вод, що, в свою чергу, знижує здатність засвоєння вологи рослинами. А залишкові кількості хлориду Натрію у вигляді дрібнодисперсного аерозолу осаджуються на деревах, спричинюючи їх пригнічення, втрату біологічної стійкості та навіть загибель. У вологому повітрі навіть діоксид Нітрогену NO₂ здатний взаємодіяти з аерозолем хлориду Натрію NaCl та утворювати такі забруднювачі, як нітратна й хлоридна кислоти. Цей процес зазвичай відбувається у 2 стадії, зокрема, на першій, проміжній стадії утворюється небезпечна нітратна кислота HNO₃ та монооксид Нітрогену NO [12]:



а на другій стадії – адсорбція її парів дрібнодисперсними частинками хлориду Натрію з виділенням також сильної кислоти – хлоридної HCl:



Зазначимо, що кінцевим продуктом трансформації діоксиду Сульфуру SO₂ у повітряному середовищі також може бути хлоридна кислота HCl, яка утворюється за хімічним рівнянням:



Аналогічна взаємодія відома й для карбонатів багатьох металів [12].

рН ґрунтової витяжки та проб води визначали потенціометричним методом при температурі 20±0,05 °С. Як електрод порівняння використовували хлорсрібний електрод, індикаторним електродом був скляний. У дослідженні як кількісний критерій сольового забруднення ґрунту, ґрунтових розчинів і проб води використано показник K_{сол.з.} (у відсотках), що дорівнює відношенню концентрації іонів Хлору Cl⁻ у ґрунтовій витяжці зразка, взятого в певній точці спостереження C(Cl⁻), до значення фонові концентрації іонів Cl⁻ C_ф(Cl⁻) у контрольній точці [13]:

$$K_{\text{сол. з.}} = C(\text{Cl}^-) 100\% / C_{\text{ф}}(\text{Cl}^-). \quad (5)$$

Зазначимо, що для характеристики кислотності ґрунтів було застосовано показники рН водних ґрунтових витяжок. Однак через високу буферність ґрунтів цей показник не завжди дає можливість правильно оцінити рівень кислотно-основного забруднення середовища. У таких випадках рекомендується використовувати показник потенційної кислотності, який визначається титруванням ґрунтових витяжок, приготованих на 1,0 М розчині хлориду Калію, стандартним розчином луґу [14]. При проведенні інструментальних досліджень проводили статистичну обробку результатів із використанням програм MS Excel та SPSS Statistics: визначали середні значення, стандартне відхилення, перевіряли значимість отриманих результатів за критерієм Стьюдента, вважаючи результат значимим при α < 0,05.

У роботі було зафіксовано суттєву зміну кислотності ґрунтових розчинів – від 5,7 майже до 9,0 одиниць, яка має сезонний характер, при фоновому значенні 5,7–6,1. При цьому рН досліджуваних поверхневих вод коливалось у межах від 5,4 до 8,7. Отже, підлугування водних розчинів навесні, після танення снігу, а також суттєве зростання концентрації хлорид-іонів у водних ґрунтових витяжках і пробах води є індикатором кислотно-сольового забруднення території, спричиненого як навантаженням з боку автотранспортних потоків, так і використанням ПОЗ.

Для встановлення рівня забруднення ґрунтового покриву територій, що є зонами відпочинку людей, за емпіричними даними кислотного і сольового забруднень нами розраховувались інтегральний показник кислотно-сольового забруднення (K_{к-с.з.}), який визначали для кожної ділянки окремо (в різні сезони) як незважену суму зміни кислотно-основного балансу досліджуваної території (за значенням показника рН_і/рН_ф) та відносний показник сольового забруднення ґрунту (C_{сол. і}/C_{сол. ф}) [15].

Відомо, що у природних і ґрунтових водах міграція хімічних елементів відбувається досить інтенсивно. При цьому, як правило, спостерігається зміна якісного й кількісного складів природних вод, а у воді й донних відкладеннях, органах рослин і тварин накопичуються небезпечні сполуки Хлору, Сульфуру, Нітрогену, Натрію, ВМ тощо. Особливо небезпечним є забруднення територій оздоровчого призначення, які, як правило, підлягають комплексному забрудненню – погіршується не тільки стан АП і водойм, а й ґрунтового покриву, рослинності, тваринного світу тощо.

Забруднення міського АП вивчали шляхом поєднання методів математичного моделювання, математичної статистики та проведення просторово-часових натурних обстежень із вивчення інтенсивності й щільності транспортних потоків на автомагістралях міста, розташованих поблизу зон відпочинку людей. Метод математичного моделювання надає змогу встановити не тільки рівень забруднення АП та придорожніх територій через викиди АТЗ, а й за допомогою обчислювального експерименту виявити ті комбінації несприятливих чинників (наприклад, атмосферних, кліматичних, метеорологічних тощо), які найсильніше впливають на дисперсію шкідливих домішок у повітрі, а також спрогнозувати рівні забруднень міського АП за цих умов.

У роботі для моделювання дисперсії ШП у атмосферному повітрі придорожнього простору використовували модель факельного наближення М. Є. Берлянда [16], що є розв'язком диференціального рівняння турбулентної дифузії з урахуванням даних щодо коефіцієнтів дифузії та властивостей підстилаючої поверхні. Ця модель дає змогу розрахувати поля разових максимальних концентрацій ШП на рівні землі і, наприклад, у 2-метровому шарі АП. При цьому, згідно з моделлю Гіффорда, концентрація домішки у факелі розглядається як результат суперпозиції нескінченної кількості точкових джерел, хмари від яких переносяться за вектором середнього вітру і розширюються в міру їх віддалення від джерела забруднення. Дифузією домішки за вектором вітру при цьому нехтують і розглядають дисперсію ШП тільки у напрямку, перпендикулярному вектору вітру [17], [18].

Методика побудови математичних моделей базується на розробках авторів робіт [19], [20]. Для оцінки рівня впливу автомагістралі на геоекологічний стан придорожніх зон відпочинку людей та з метою подальшого моделювання забруднень від автотранспорту нами використано методику інвентаризації викидів ШП від АТЗ, розроблену А. В. Рузьким та В. В. Донченком [9], [21]. При моделюванні враховувались стан підстилаючої поверхні, метеоумови, характеристики автотранспортних потоків, щільність і швидкість їх руху, типи АТЗ, дорожні умови, довжину та ширину досліджуваної ділянки тощо. Поля дисперсії будувались для таких шкідливих домішок, як монооксид Карбону CO, оксиди Нітрогену у перерахунку на діоксид Нітрогену NO₂, дрібнодисперсні частинки сажі та пилу – РМ. При моделюванні вважали, що дисперсія РМ з розміром ≤ 10 мкм підпорядковується закономірностям, що є характерними для дисперсії газів, тоді як для частинок більш великих розмірів ці закономірності суттєво змінюються [19].

Отже, для комплексного обстеження території нами обиралась ділянка зони відпочинку, проводився її детальний аналіз, вивчалось її розміщення відносно дороги й автотранспортне навантаження поблизу, визначались ті фактори, що чинять найсильніший негативний вплив на рівень її забруднення. Окремо встановлювали вид діяльності людей та локалізацію місць їх відпочинку, наприклад, паркова зона, кафе, місця для активних ігор, імпровізовані чи стаціонарні дитячі майданчики, місця для купання, ловлі риби та ін. Як приклад на рис. 1 подана карта і фотографії досліджуваної ділянки зони відпочинку людей з розташованим поряд водним об'єктом – озером Райдужне (м. Київ). Ця територія використовується населенням мікрорайону і для прогулянок, у тому числі з маленькими дітьми, і для водного відпочинку тощо. Поряд з дорогою розташовані "відкриті" кафе, а натурні спостереження за автомагістраллю по вул. Райдужна показують, що нею часто користуються і велосипедисти.

На рис. 2 і 3 показано приклади полів дисперсії основних забруднювачів – інгредієнтів відпрацьованих газів АТЗ – за небезпечних для даної місцевості метеоумов; зеленим кольором позначено відстань від дороги, на якій рівень забруднення стає екологічно прийнятним.

Для характеристики рівнів забруднення АП придорожнього простору і прилеглих територій за результатами математичного моделювання й обчислювального експерименту застосовували таку градацію [20]:

1 бал – екологічно безпечний рівень (зона, де немає перевищення максимальної разової гранично допустимої концентрації);

2 бали – середній рівень забруднення (зона, де перевищення ГДК_{м.р.} певної шкідливої домішки становить від 1 до 4,4 ГДК_{м.р.});

3 бали – високий рівень забруднення (зона, де перевищення ГДК_{м.р.} становить від 4,4 до 8,0);

4 бали – екологічно небезпечний стан (зона, де перевищення ГДК_{м.р.} становить вище за 8,0).

Для характеристики рівнів геохімічного навантаження на ґрунтовий покрив досліджуваної території запропоновано таку градацію:

1 бал, якщо за даними математичного моделювання встановлено, що пилове забруднення за зваженими частинками РМ перевищує ГДК_{м.р.};

2 бали, якщо емпірично встановлено наявність кислотно-сольового забруднення території;

3 бали, якщо встановлена наявність у ґрунті та ґрунтовому розчині сполук важких металів;

4 бали, якщо спостерігається перевищення гранично допустимого рівня радіоактивного випромінювання.

Для характеристики рівнів забруднення поверхневих водних об'єктів, розташованих на рекреаційних територіях, пропонуємо таку градацію:

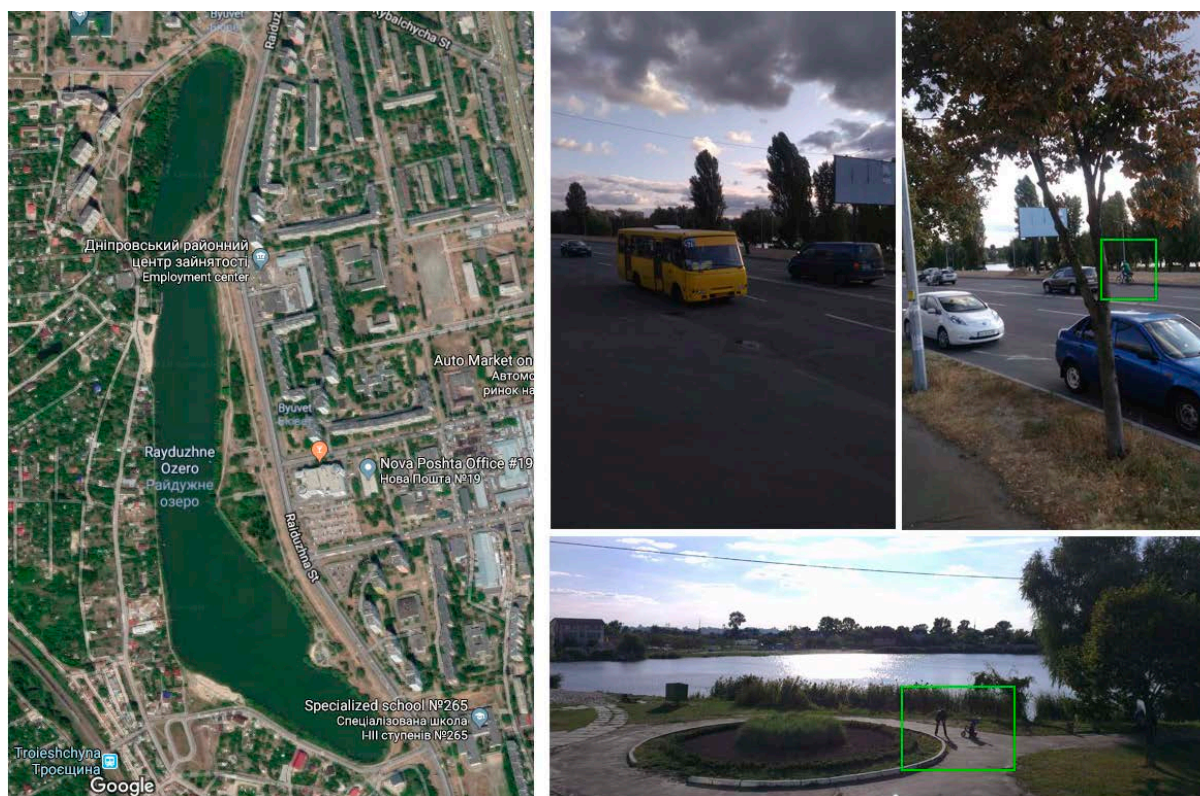


Рисунок 1 – Карта (супутниковий знімок) та фотографії досліджуваної ділянки зони відпочинку людей поряд з озером Райдужне (м. Київ, вул. Райдужна).

- 1 бал – наявність кислотно-сольового забруднення водойми;
- 2 бали – наявність у пробах води синтетичних ПАР та плівки нафтопродуктів (встановлюється за натурними спостереженнями та вимірюванням поверхневого натягу за допомогою сталагмометра);
- 3 бали – наявність у пробах води сполук важких металів;
- 4 бали – перевищення гранично допустимого рівня радіоактивного випромінювання.

Таким чином, згідно розробленої нами методики, отримані за методом математичного моделювання дані щодо рівнів забруднення придорожнього простору певними інгредієнтами викидів АТЗ, а також емпіричні дані далі використовуються для обчислення інтегрального показника (у балах) геохімічного навантаження з боку автотранспорту на ділянку рекреаційного призначення. Запропонований нами показник враховує (залежно від виду зони відпочинку та діяльності на ній людей) рівні забруднення АП (за всіма досліджуваними домішками), забруднення ґрунтів і ґрунтових розчинів (пилоче, кислотно-сольове, важкими металами та радіоактивне), поверхневих вод (кислотно-сольове, ПАР, сполуками ВМ та радіоактивне), а також за наявності біоіндикаційні дослідження (наприклад, за методом ліхеноіндикації для паркових зон і скверів) тощо.

Запропонований нами інтегральний показник геохімічного навантаження використано для комплексної оцінки стану рекреаційних територій міста, проте опосередковано його можна пов'язати й зі здоров'ям мешканців, які їх відвідують. Його залежність від виду діяльності людей, зокрема, сімейний відпочинок з дітьми, пікнік, відвідування "відкритого" кафе, прогулянка, купання тощо обумовлює й певні відмінності у силі впливу конкретної складової довколишнього середовища на цей інтегральний показник, що можна врахувати коригуванням відповідних вагових коефіцієнтів. Наприклад, на територіях, що більшою мірою використовуються для прогулянок, у паркових зонах тощо найсильніший вплив чинить якість атмосферного повітря і ґрунтів. За умови наявності поблизу водойм важливим стає і їх екологічний стан, навіть якщо їх не використовують для купання. Сильно впливає і наявність у безпосередній близькості до рекреаційної території житлової забудови, що створює додаткові труднощі для розсіювання домішок АП.

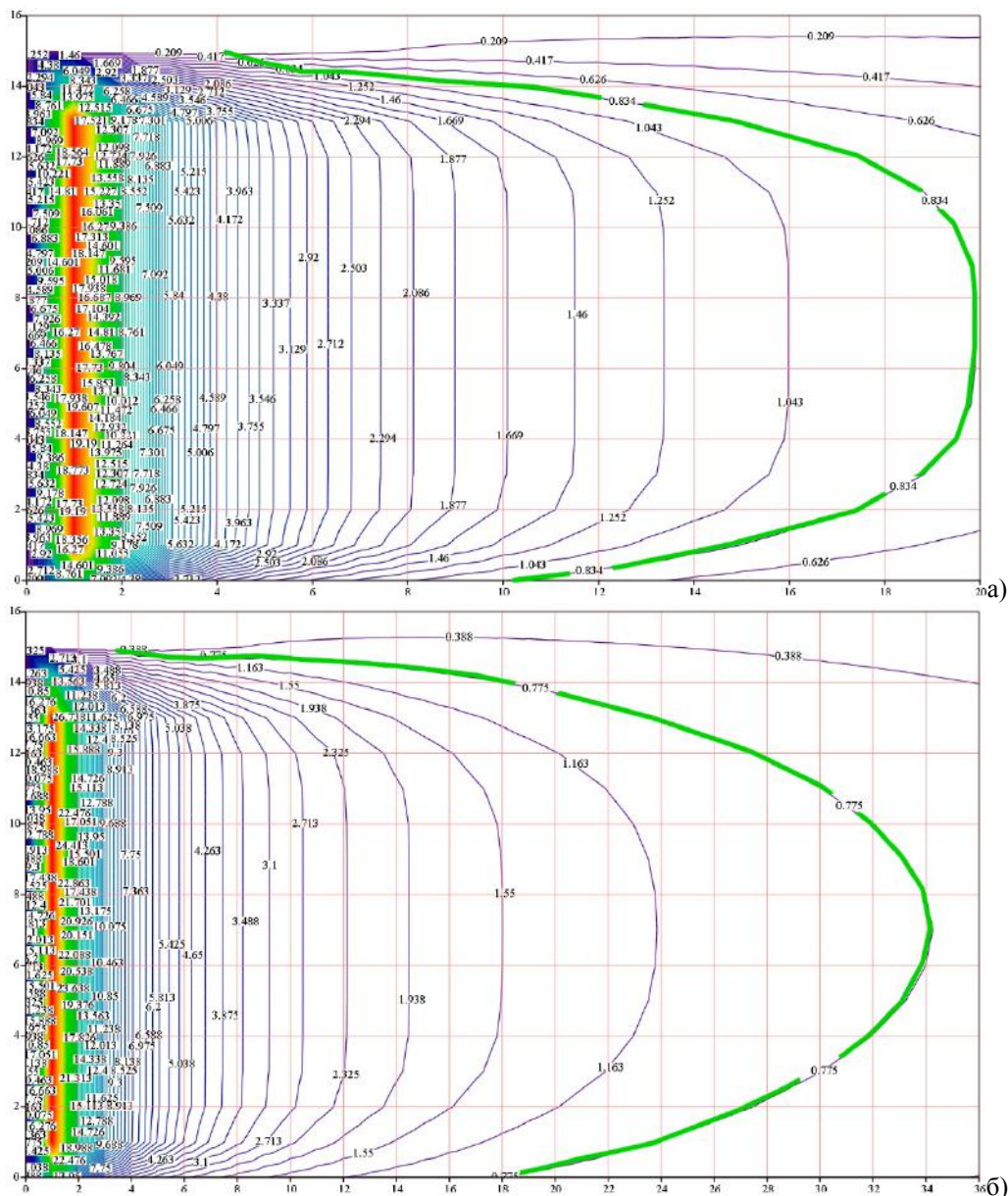


Рисунок 2 – Приклади полів дисперсії компонентів відпрацьованих газів АТЗ: а) монооксиду Карбону; б) оксидів Нітрогену у перерахунку на NO₂ на ділянці зони відпочинку поряд з озером Райдужне (м. Київ) за небезпечних для даної місцевості метеоумов: напрям вітру – північно-східний, швидкість вітру – 3 м/с.

Отже, у загальному вигляді інтегральний показник геохімічного навантаження з боку автотранспортних потоків на територію рекреаційного призначення розраховується як сума показників забруднення окремих складових довкілля – АП, ґрунтів та водойм з урахуванням вагових коефіцієнтів, які залежать від призначення досліджуваної ділянки та виду діяльності на ній людей:

$$ІПН = \sum_{i=1}^n k_i \cdot x_i, \quad (6)$$

де ІПН – інтегральний показник геохімічного навантаження з боку автотранспорту; n – загальна кількість показників, що входять до ІПН; k_i – ваговий коефіцієнт для кожного з досліджуваних показників; x_i – значення кожного із показників забруднення, що формують ІПН.

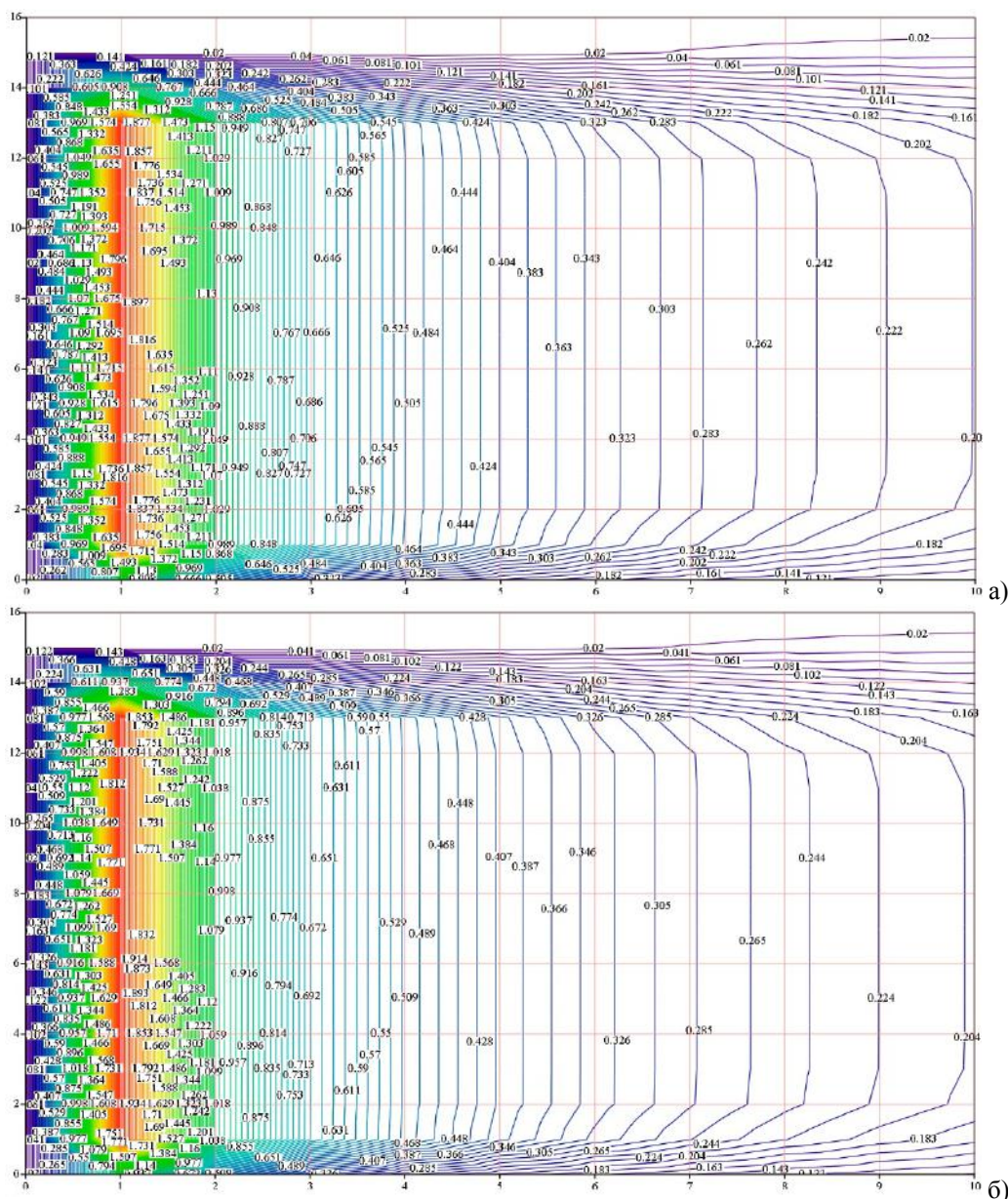


Рисунок 3 – Приклади полів дисперсії дрібнодисперсних частинок сажі розміром до 10 мкм на ділянці зони відпочинку поряд з озером Райдушне (м. Київ) за небезпечних для даної місцевості метеоумов: напрям вітру – північно-східний, швидкість вітру – 3 м/с (а) 10 м/с (б).

Для нашого дослідження формула (6) із врахуванням забруднення АП, ґрунтів та водойми – озера Райдушне (м. Київ), матиме вигляд:

$$ПН = k_A \cdot x_A + k_S \cdot x_S + k_W \cdot x_W, \quad (7)$$

де k_A , k_S , k_W – вагові коефіцієнти для показників геохімічного забруднення АП, ґрунтів і водойми, відповідно; x_A , x_S , x_W – значення показників геохімічного забруднення атмосферного повітря, ґрунтів і поверхневих вод (у балах), відповідно. За наявності біоіндикаційних досліджень території показники ПН геохімічного забруднення можуть бути уточнені.

Для характеристики інтегрального показника геохімічного забруднення (у балах), розрахованого за формулою (7), пропонуємо таку градацію:

ПН = 3 – екологічно-прийнятний стан досліджуваної рекреаційної території;

4 ≤ ПН < 7 – середній рівень геохімічного навантаження території;

7 ≤ ПН < 10 – високий рівень геохімічного навантаження території;

10 ≤ ПН ≤ 12 – дуже високий рівень геохімічного навантаження на територію з боку автотранспортних потоків.

Таким чином, як видно з рис. 2 (а, б) і 3 (а), у місцях перебування людей на досліджуваній території серед проаналізованих домішок найбільше перевищення $GDK_{м.р.}$ спостерігається для оксидів Нітрогену (у перерахунку на NO_2) – приблизно у 3,8 раз. Тому показник x_A встановлено як 2 бали. Зазначимо, що у даному дослідженні під час підрахунку ППН досліджуваної території вагові коефіцієнти прийнято такими, що дорівнюють 1, оскільки нами не враховувались особливості відпочинку людей на цій території.

Зважаючи на наявність у ґрунті сполук важких металів (зокрема, Купруму, Цинку та Кадмію), приймаємо $x_S = 3$ бали. А оскільки на водному об'єкті встановлено зміну поверхневого натягу і наявність плівок нафтопродуктів, то $x_W = 2$ бали. Отже, комплексним аналізом екологічного стану території рекреаційного призначення встановлено, що інтегральний показник геохімічного навантаження зони відпочинку із озером Райдужне дорівнює 7, що характеризує високий рівень забруднення досліджуваної території.

Висновки

1. Встановлено, що автотранспортні потоки столиці, чинять значний негативний вплив на певні ділянки рекреаційних зон, розташованих поблизу дороги. Особливо небезпечним для здоров'я дорослих і дітей є забруднення атмосферного повітря і придорожніх ґрунтів, оскільки саме під час активного відпочинку люди споживають забруднене шкідливими речовинами і дрібнодисперсним пилом повітря, використовують для ігор забруднений ґрунтовий покрив, грають у забрудненій рослинності, вигулюють собак тощо.

2. Емпіричні дослідження показали, що під впливом викидів ВГ автотранспортних засобів значною мірою погіршуються фізичні, хімічні, фізико-хімічні, біохімічні та, як наслідок, екологічні показники середовища, формуються локальні ареали геохімічних аномалій, а також відбувається неперервна міграція токсикантів по компонентах навколишнього середовища та ланцюгах живлення.

3. Просторово-часові натурні обстеження характеристик автотранспортних потоків, дорожніх умов та метеумов, а також вивчення характеру підстилаючої поверхні на прилеглих до зон відпочинку автомагістралей з використанням програмного комплексу MathCad надали можливість побудувати поля дисперсії основних забруднювачів – інгредієнтів відпрацьованих газів АТЗ – CO , NO_x та PM , визначити умови їх розсіювання та локального небезпечного концентрування за різних погодних і метеумов, а також надати рекомендації щодо організації відпочинку людей на досліджуваних територіях, особливо за несприятливих для розсіювання ШР погодних умов.

4. За допомогою обчислювального експерименту та емпіричних даних розраховано інтегральний показник геохімічного навантаження на досліджувану зону відпочинку (ППН = 7 – високий рівень геохімічного навантаження) та встановлено найнебезпечніший для даної території напрямок вітру (північно-східний), його швидкість (3 м/с для монооксиду Карбону і оксидів Нітрогену у перерахунку на NO_2 ; 3 м/с і 10 м/с для дрібнодисперсних частинок сажі), дорожні умови тощо.

5. Встановлено, що повітряний простір, водні об'єкти міста, паркові зони та інші території рекреаційного призначення столиці у більшості випадків несуть значне екологічне навантаження з боку автотранспортних потоків, а досить часто, замість очікуваної рекреаційної дії, навіть становлять загрозу для здоров'я людей.

Список використаної літератури

1. Парсаданов І. В. Підвищення якості і конкурентоспроможності дизелів на основі комплексного паливно-екологічного критерію : монографія. Харків : НТУ "ХПІ", 2003. 244 с.
2. Центральна геофізична обсерваторія імені Бориса Срезневського : веб-сайт. URL: <http://cgo-sreznevskiy.kiev.ua> (дата звернення: 17.01.2019).
3. Зилов Е. А. Гидробиология и водная экология (организация, функционирование и загрязнение водных экосистем) : учебное пособие. Иркутск : Иркутский университет, 2008. 138 с.
4. Транспортна екологія. Методично-інформаційні матеріали до самостійного вивчення дисципліни та виконання індивідуальних завдань для студ. напряму підготов. 6.070101 Транспортні технології (за видами транспорту) / Павличенко А. В., Лисицька С. М., Борисовська О. О., Деменко О. В. Дніпропетровськ : Нац. гірничий ун-т, 2012. 39 с.
5. Кофанова Е. В., Борисов А. А., Евтеєва Л. И. Рассеивание вредных веществ в придорожном воздушном пространстве вблизи водных объектов г. Киева. Горная механика и машиностроение. 2018. № 2. С. 31–38.
6. Борисов О. О., Кофанова О. В. Проблеми вторинної міграції хімічних елементів – інгредієнтів викидів автотранспортних засобів на придорожніх рекреаційних територіях міст. Екологічні науки. 2019. Вип. 1 (924). т. 1. С. 17–21.
7. Кофанов О. Є., Борисов О. О. Екологічне навантаження з боку автотранспортних потоків на придорожні території рекреаційного призначення. Енергетика : економіка, технології, екологія. 2018. № 4.

С. 124–133.

8. Рабош, І. О., Кофанова О. В. Ліхеноіндикаційні дослідження в градієнті антропогенного навантаження (на прикладі паркових зон м. Києва). Екологічні науки. 2019. Вип. 1 (924). т. 1. С. 46–50.

9. Расчетная инструкция (методика) по инвентаризации выбросов загрязняющих веществ автотранспортными средствами в атмосферный воздух / Рузский А. В. и др. Москва, 2006. URL: <http://www.opengost.ru/iso/3174-raschetnaya-instrukciya-metodika-po-inventarizacii-vybrosov-zagryaznyayuschih-veschestv-avtotransportnymi-sredstvami-v-atmosfernyy-vozduh.html> (дата звернення: 17.01.2019).

10. Степура В. С., Белятинський А. О., Кужель Н. В. Основи експлуатації автомобільних доріг і аеродромів: навчальний посібник. Київ, 2013. 204 с.

11. Платонов А. П. Меры снижения воздействия противогололедных материалов на придорожные территории. Наука и техника в дорожной отрасли. 1997. № 2. С. 11.

12. Опаловский А. А. Планета Земля глазами химика. Москва : Наука, 1990. 224 с.

13. Борисов О. О. Геоекологічна оцінка ризику кислотно-сольового забруднення примігстральних ділянок педосфери (на прикладі міста Києва). Техніка, енергетика, транспорт АПК. 2016. № 4(96). С. 41–48.

14. Хабаров В. А. Комплексная геоэкологическая оценка урбанизированных территорий в условиях техногенеза : дис. ... д-ра геогр. наук : 25.00.36 / Москва, 2003. 570 с.

15. Борисов О. О., Кофанова О. В. Комплексний аналіз геохімічного стану придорожніх територій великого міста. Вісник Нац. техніч. ун-ту "ХПІ". Сер. : Нові рішення в сучасних технологіях. 2017. № 32(1254). С. 91–97. DOI:10.20998/2413-4295.2017.32.15.

16. Берлянд М. Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. Ленинград : Гидрометеоздат, 1975. 449 с.

17. Чернявский С. А. Исследование трансформации химических примесей в атмосфере и оценка экологического риска как условие повышения информативности системы мониторинга : дис. ... канд. техн. наук : 05.11.13 / Москва, 2016. 136 с.

18. Замай С. С., Якубайлик О. Э. Моделирование оценки и прогноза загрязнения атмосферы промышленными выбросами в информационно-аналитической системе природоохранных служб крупного города : учеб. пособ. Красноярск : Красноярский гос. ун-т, 1998. 109 с.

19. Системный анализ и принятие решений. Технология вычислений в системе компьютерной математики Mathcad : учеб. пособ. / В. А. Холоднов и др. Санкт-Петербург, 2013. 154 с.

20. Кофанов О. Є. Моделювання розсіювання і локального концентрування поллютантів у придорожньому повітряному просторі. Вісник НТУ «ХПІ». Сер. : Нові рішення в сучасних технологіях. 2018. № 9 (1285). С. 190–197.

21. Методы расчета выбросов от автотранспорта и результаты их применения / В. В. Донченко и др. Журнал автомобильных инженеров. 2014. № 3 (86). С. 44–51.

O. Borysov, ORCID 0000-0002-1053-2989

O. Kofanova, ORCID 0000-0002-9851-6392

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

INTEGRAL INDICATOR OF GEOCHEMICAL POLLUTION OF URBAN RECREATIONAL TERRITORIES CAUSED BY MOTOR TRAFFIC

The influence of the traffic flows in Kyiv city and harmful substances emissions on the recreational territories was investigated in the paper. A methodology and an integral indicator of the geochemical load on the recreational territories by vehicles and components of their emissions were developed. The integral indicator takes into account (depending on the type of the recreation area and people activity): levels of atmospheric air pollution, contamination of soil and surface waters, as well as bioindicational indicators of the investigated territory. The methods of mathematical statistics, mathematical modeling, field observations, empirical studies and computational experiment have been applied in order to calculate the integral indicator of the geochemical load on the urban recreational territories. In order to determine the pollution of the roadside areas and to predict the ecological status of the studied territories, the semi-empirical equation of turbulent diffusion was used, taking into account the fact that the processes of dispersion and local concentration of harmful impurities in certain parts of the territory are affected by the direction and speed of wind, meteorological conditions, physicochemical properties of pollutants, various processes of their secondary transformation in the environment, as well as the conditions of sedimentation and secondary

mechanical settling. On the bases of the solution of this equation, the dispersion fields of hazardous substances that are ingredients of exhaust gases of vehicles (in particular, nitrogen and carbon oxides, fine dust) were built taking into account dangerous wind direction and speed. By the integral indicator, it was determined that the studied roadside recreational territories in many cases are potentially dangerous for human health due to the harmful effects of the motor traffic flows.

Keywords: recreational territory, roadside territories, vehicle load, environmental safety, vehicle emissions, the integral indicator of the geochemical load.

References

1. Parsadanov I. V. Pidvyshchennia yakosti i konkurentospromozhnosti dyzeliv na osnovi kompleksnogo palyvno-ekolohichnogo kryteriiu : monohrafiia. Kharkiv : NTU "KhPI", 2003. 244 s.
2. Tsentralna heofizychna observatoriia imeni Borysa Sreznhevskoho : veb-sait. URL: <http://cgo-sreznhevskiy.kiev.ua> (data zvernennia: 17.01.2019).
3. Zilov E. A. Hidrobiologiya i vodnaya ekologiya (organizatsiya, funktsionirovanie i zagryaznenie vodnykh ekosistem) : uchebnoe posobie. Irkutsk : Irkutskiy universitet, 2008. 138 s.
4. Transportna ekolohiia. Metodychno-informatsiini materialy do samostiinoho vyvchennia dystsypliny ta vykonannia individualnykh zavdan dlia stud. napriamu pidhotov. 6.070101 Transportni tekhnolohii (za vydamy transportu) / Pavlychenko A. V., Lysytska S. M., Borysovska O. O., Demenko O. V. Dnipropetrovsk : Nats. hirnychiy un-t, 2012. 39 s.
5. Kofanova E. V., Borisov A. A., Evteeva L. I. Rasseivanie vrednykh veshchestv v pridorozhnom vozdushnom prostranstve vblizi vodnykh ob"ektov g. Kiev. Gornaya mekhanika i mashinostroenie. 2018. № 2. S. 31–38.
6. Borysov O. O., Kofanova O. V. Problemy vtorynoyi mihratsii khimichnykh elementiv – inhrediiientiv vykydiv avtotransportnykh zasobiv na prydorozhnikh rekreatsiinykh terytoriiakh mist. Ekolohichni nauky. 2019. Vyp. 1 (924). t. 1. S. 17–21.
7. Kofanov O. Ye., Borysov O. O. Ekolohichne navantazhennia z boku avtotransportnykh potokiv na prydorozhni terytorii rekreatsiinoho pryznachennia. Enerhetyka : ekonomika, tekhnolohii, ekolohiia. 2018. № 4. S. 124–133.
8. Rabosh, I. O., Kofanova O. V. Likhenoindykatsiini doslidzhennia v hradiiienti antropohennoho navantazhennia (na prykladii parkovykh zon m. Kyieva). Ekolohichni nauky. 2019. № 1 (924). t. 1. S. 46–50.
9. Raschetnaya instruksiya (metodika) po inventarizatsii vybrosov zagryaznyayushchikh veshchestv avtotransportnymi sredstvami v atmosferynyy vozdukh / Ruzskiy A. V. i dr. Moskva, 2006. URL: <http://www.opengost.ru/iso/3174-raschetnaya-instrukciya-metodika-po-inventarizacii-vybrosov-zagryaznyayuschih-veshchestv-avtotransportnymi-sredstvami-v-atmosferynyy-vozduh.html> (data zvernennia: 17.01.2019).
10. Stepura V. S., Bieliatynskiy A. O., Kuzhel N. V. Osnovy ekspluatatsii avtomobilnykh dorih i aerodromiv: navchalnyi posibnyk. Kyiv, 2013. 204 s.
11. Platonov A. P. Mery snizheniya vozdeystviya protivogolodnykh materialov na pridorozhnye terytorii. Nauka i tekhnika v dorozhnoy otrasli. 1997. № 2. S. 11.
12. Opalovskiy A. A. Planeta Zemlya glazami khimika. Moskva : Nauka, 1990. 224 s.
13. Borysov O. O. Heoekolohichna otsinka ryzyku kyslotno-solovoho zabrudnennia prymahistralnykh dilianok pedosfery (na prykladii mista Kyieva). Tekhnika, enerhetyka, transport APK. 2016. № 4(96). S. 41–48.
14. Khabarov V. A. Kompleksnaya geoekologicheskaya otsenka urbanizirovannykh terytoriy v usloviyakh tekhnogeneza : dis. ... d-ra geogr. nauk : 25.00.36 / Moskva, 2003. 570 c.
15. Borysov O. O., Kofanova O. V. Kompleksnyi analiz heokhimichnogo stanu prydorozhnikh terytorii velykoho mista. Visnyk Nats. tekhnich. un-tu "KhPI". Ser. : Novi rishennia v suchasnykh tekhnolohiiakh. 2017. № 32(1254). S. 91–97. DOI:10.20998/2413-4295.2017.32.15.
16. Berlyand M. E. Sovremennye problemy atmosferynoy diffuzii i zagryazneniya atmosfery. Leningrad : Gidrometeoizdat, 1975. 449 s.
17. Chernyavskiy S. A. Issledovanie transformatsii khimicheskikh primesey v atmosfere i otsenka ekolohicheskogo riska kak uslovie povysheniya informativnosti sistemy monitoringa : dis. ... kand. tekhn. nauk : 05.11.13 / Moskva, 2016. 136 s.
18. Zamay S. S., Yakubaylik O. E. Modelirovanie otsenki i prognoza zagryazneniya atmosfery promyshlennymi vybrosami v informatsionno-analiticheskoy sisteme prirodookhrannykh sluzhb krupnogo goroda : ucheb. posob. Krasnoyarsk : Krasnoyarskiy gos. un-t, 1998. 109 s.
19. Sistemnyy analiz i prinyatie resheniy. Tekhnologiya vychisleniy v sisteme komp'yuternoy matematiki Mathcad : ucheb. posob. / V. A. Kholodnov i dr. Sankt-Peterburg, 2013. 154 s.
20. Kofanov O. Ye. Modeliuvannia rozsiuvannia i lokalnogo kontsentruvannia polutantiv u prydorozhnomu povitriannomu prostori. Visnyk NTU «KhPI». Ser.: Novi rishennia v suchasnykh tekhnolohiiakh.

2018. № 9 (1285). S. 190–197.

21. Metody rascheta vybrosov ot avtotransporta i rezul'taty ikh primeneniya / V. V. Donchenko i dr. Zhurnal avtomobil'nykh inzhenerov. 2014. № 3 (86). S. 44–51.

А. А. Борисов, аспирант, ORCID 0000-0002-1053-2989

Е. В. Кофанова, доктор пед. наук, канд. хим. наук, профессор, ORCID 0000-0002-9851-6392
Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт имени
Игоря Сикорского"

ИНТЕГРАЛЬНЫЙ ПОКАЗАТЕЛЬ ГЕОХИМИЧЕСКОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ГОРОДСКИХ РЕКРЕАЦИОННЫХ ТЕРРИТОРИЙ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ АВТОТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ

В работе исследовано влияние автотранспортных потоков г. Киева и выбросов вредных веществ на территории, предназначенные для отдыха людей. Разработана методика и предложен интегральный показатель геохимической нагрузки на территорию рекреационного назначения со стороны автотранспорта и компонентов выбросов автотранспортных средств, учитывающий (в зависимости от вида зоны отдыха и деятельности людей): уровни загрязнения атмосферного воздуха, загрязнение почв и грунтовых растворов, поверхностных вод, а также биоиндикационные показатели исследуемой территории. Для расчета интегрального показателя применены методы математической статистики, математического моделирования, натурные наблюдения, эмпирические исследования и вычислительный эксперимент. По интегральному показателю установлено, что исследуемые придорожные зоны отдыха людей часто являются потенциально опасными для здоровья из-за вредного воздействия автотранспортных потоков. При различных погодных и метеорологических условиях спрогнозировано влияние автотранспортных потоков на экологическое состояние исследуемых территорий при определенной дорожной ситуации.

Ключевые слова: рекреационная зона, придорожные территории, автотранспортная нагрузка, экологическая безопасность, выбросы автотранспортных средств, интегральный показатель геохимической нагрузки.

Надійшла 21.01.2019

Received 21.01.2019

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 лексику 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 установи, 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;](http://energy.kpi.ua)
- e-mail: kravkpi@ukr.net