

ISSN 1813-5420

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

ЕНЕРГЕТИКА

економіка, технології, екологія



Науковий журнал

№1–2018

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

ЕНЕРГЕТИКА

економіка, технології, екологія

Науковий журнал

№ 1 (51) - 2018

Виходить 4 рази на рік

Заснований у березні 2000 року

Глобальні проблеми енергетики та енергетична безпека

Лібералізовані ринки енергії

Енергетика сталого розвитку

Енергетична ефективність та енергозбереження

Технології та обладнання в енергетиці

Моніторинг, діагностика та керування енергетичними
процесами та обладнанням

Екологічні проблеми в енергетиці

Київ

КПІ ім. Ігоря Сікорського
2018

Головний редактор – Ю.І. Якименко

Заступники

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

Відповідальний секретар – О.О. Закладний

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

ЗАКОРДОННІ ЧЛЕНИ

РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ: Е. Хандшин (*Дортмундський технічний університет, інститут енергетичних систем та економіки енергетики, Німеччина*), Ричард 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*)

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 № 5 від 14 травня 2018 р.).

Коректор В.Г. Смоляр. Комп'ютерна верстка П.В. Соколовський.

Відповідальний за випуск видання Н.О.Кравчук.

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

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

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

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

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018

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

POWER ENGINEERING

economics, technique, ecology

ENERHETYKA:
ekonomika, tekhnolohiyi, ekolohiya

The Scientific Journal

№ 1 (51) - 2018

Published 4 issues per year

Founded in March 2000

Global energy issues and energy security
Liberalized energy market
Sustainable energy
Energy efficiency and energy saving
Energy technologies and equipment
Monitoring, diagnostic and management of power processes and equipment
economic aspects of power-engineering
Environmental problems in energy

Kyiv

Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

2018

Editor-in-chief Yu.I. Yakymenko

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

Deputy O.O. Zakladnyi

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

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

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, Djerelo, 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 № 5 on May 14, 2018).

Proofreading V.G. Smoliar. Desktop publishing P.V. Sokolovskiy.
Responsible for the publication N.O. Kravchuk.

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

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

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

Attention! Reprint material in other publications only with the permission of editorial board of the journal **POWER ENGINEERING: Economics, Technique, Ecology**
© Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2018

ЗМІСТ

ГЛОБАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ ЕНЕРГЕТИКИ ТА ЕНЕРГЕТИЧНА БЕЗПЕКА

- Є.М. Письменний, С.В. Клевцов.** Методология исследования детерминистических запасов безопасности атомных станций 7
- В.В. Прокопенко, О.О. Закладний, В. Дєлов, П. Хадка.** Моделювання режимів роботи промислового опалення, вентиляції та кондиціонування повітря 16

ЛІБЕРАЛІЗОВАНІ РИНКИ ЕНЕРГІЇ

- А.І. Замулко, Ю.А. Веремійчук.** Організація обмеження споживачів на роздрібному ринку електричної енергії : правові питання..... 23

ЕНЕРГЕТИКА СТАЛОГО РОЗВИТКУ

- І.В. Притискач, В.О. Оникійчук.** Аналіз та оптимізація режимів роботи інтегрованих систем комплексного енергозабезпечення споживачів із урахуванням економічних та екологічних факторів 33
- Л.С. Зубченко, Є.В. Кузьмінський.** Біоелектрохімічні аспекти вибору фотоелектрохімічної складової фотобіоелектрохімічних систем..... 41

ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

- В.В. Зорин, Ю.М. Мацкевич.** Компенсация реактивной мощности в стояках высотных зданий 47
- Р.В. Мордас, Л.Н.Лебедь.** Моделювання теплового стану будівлі з системою термоактивного утеплення..... 58
- Л.К. Лістовщик, О.В. Лотонова.** Енергоощадна система запобігання процесу відкладення парафінів на стінках нафтової свердловини..... 67
- О.А. Жученко, А.П. Коротинський.** Дослідження впливу надлишку повітря на процес нагрівання багатокамерної печі випалювання димовими газами 71

ТЕХНОЛОГІЇ ТА ОБЛАДНАННЯ В ЕНЕРГЕТИЦІ

- В.І. Коньшин, Т.Г. Іваненко.** Оцінка технічного стану теплообмінника системи розхолодження басейну витримки для ядерної енергетичної установки з реактором ввер-1000 з метою продовження терміну експлуатації..... 81
- Г.Б. Варламов, А.О. Капустянський.** Вплив характеристик непроектного твердого палива на показники надійності та економічності роботи котельного устаткування..... 90
- А.О. Ічетовкін, Д.О. Кулагін, В.В. Ніценко.** Проблеми експлуатації диференційного струмового захисту силових трансформаторів і автотрансформаторів та заходи з їх вирішення..... 99
- С.В. Казанський, В.І. Моссаковський, Р.А. Меркотан.** Дослідження коливань проводів повітряних ліній електропередачі з урахуванням ожеледно-вітрових навантажень 108
- А.В. Баранюк, А.М. Терех, В.А. Янушевський.** CFD-моделирование аэродинамического сопротивления пучков винтообразных труб 116

МОНІТОРИНГ, ДІАГНОСТИКА ТА КЕРУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ ТА ОБЛАДНАННЯМ

- А.В. Торопов, Л.В.Торопова.** Квазиоптимальное управление загрузкой конвейера на основе минимаксного критерия качества 125
- В.В. Михайленко, Ю.М. Чуняк., О.С. Чарняк.** Дослідження перетворювача з восьмизонним регулюванням напруги 132

ЕКОЛОГІЧНІ ПРОБЛЕМИ В ЕНЕРГЕТИЦІ

- В.П. Розен, С.В. Дяченко.** Методи та установки для підготовки водопаливних емульсій як альтернатива традиційним паливам 138
- Н.С. Ремез, В.О. Броницький.** Прогнозування стійкості полігону твердих побутових відходів при його створенні 146
- Т.В. Гребенюк, О.О. Закладний.** Аналіз моделювання процесу розповсюдження радіоактивних відходів 152
- Вимоги до оформлення статей..... 157

CONTENTS

GLOBAL ENERGY ISSUES AND ENERGY SECURITY

- Ev. Pysmenny, S. Klevtsov.** Methodology of the research of deterministic safety margins of nuclear power plants 7
- V. Prokopenko, O. Zakladnoy, V. Dielov, P. Khadka.** Modeling of operating modes of industrial heating, ventilation and air conditioning 16

LIBERALIZED ENERGY MARKET

- A. Zamulko, Y. Veremiichuk.** Organization of consumer restrictions on retail electricity market: legal issues..... 23

SUSTAINABLE ENERGY

- I. Prytyskach, V. Onikiychuk.** Analysis and optimization of complex energy supply integrated systems with consideration of economic and environmental factors..... 33
- L. Zubchenko, Ye. Kuzminskiy.** Bioelectrochemical background of photocatode selection for photobioelectrochemical system..... 41

ENERGY EFFICIENCY AND ENERGY SAVING

- V. Zorin, Y. Matskevych.** Compensation of reactive power in the stands height buildings 47
- R. Mordas, N. Lebed.** Modeling of the heat condition of the building with the system of thermo-active insulation 58
- L. Listovshchyk, O. Lotonova.** Energy-saving system to prevent of the process of paraffin accumulation on the walls of an oil well 67
- O. Zhuchenko, A. Korotynskiy.** Research the influence of excess air on the process of heating multi-chamber baking furnace by using flue gases 71

ENERGY TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT

- V. Konshyn, T. Ivanenko.** Assessment of the technical state of the heat exchanger of the cooling system of the fuel storage pool for the nuclear power plant with the wwer-1000 reactor with the aim of operation prolongation..... 81
- G. Varlamov, A. Kapustyanskii.** Influence of characteristics of non-project solid fuel on reliability and efficiency of boilers. 90
- A. Ichetovkin, D. Kulagin, V. Nitsenko.** Problems in operation of transformer differential protection relays and activities for their solution 99
- S. Kazanskiy, V. Mossakovskiy, R. Merkotan.** Researching of the of overhead transmission line wires oscillations taking into account of ice-wind loadings 108
- A. Baranyuk, A. Terekh, V. Yanushevskyy.** CFD-modeling of aerodynamic drag of bundles of helical tubes..... 116

MONITORING, DIAGNOSTIC AND MANAGEMENT OF POWER PROCESSES AND EQUIPMENT

- A. Toropov, L. Toropova.** Quasi-optimal control of conveyor loading based on minimax quality criteria . 125
- V. Mihaylenko, Y. Chunya, O. Charnyak.** Study of converter with twenty zone regulation voltage..... 132

ENVIRONMENTAL PROBLEMS IN ENERGY

- V. Rozen, S. Dyachenko.** Methods and installations for preparing of water in fuel emulsions as alternative for traditional fuels 138
- N. Remez, V. Bronytskiy.** Forecasting the stability of the solid waste landfill under its creation 146
- T. Hrebeniuk, O. Zakladniy.** Analysis modeling of distribution of radioactive waste 152

ГЛОБАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ ЕНЕРГЕТИКИ ТА ЕНЕРГЕТИЧНА БЕЗПЕКА GLOBAL ENERGY ISSUES AND ENERGY SECURITY

УДК 621.311.25:621.039.58

Є.М. Письменний, д-р техн. наук, проф. ORCID 0000-0001-6403-6596

С.В. Клевцов, асистент ORCID 0000-0003-14055048

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

МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕТЕРМИНИСТИЧЕСКИХ ЗАПАСОВ БЕЗОПАСНОСТИ АТОМНЫХ СТАНЦИЙ

На современном этапе развития ядерной энергетики к ней предъявляется всё больше требований в части обеспечения безопасности ядерных энергоустановок, как со стороны традиционных международных организаций, таких как МАГАТЭ, так и со стороны общественно-политических организаций и движений, что приводит к чрезмерному росту затрат и снижению её конкурентоспособности. Для достижения баланса между жёсткими требованиями обеспечения высокого уровня безопасности АЭС и расходами на его поддержание необходима разработка новых детерминистических методик, так как существующие количественно учитывают только вероятностные факторы. В статье предлагается подход по количественной оценке такого основного фактора безопасности, как детерминистический, что позволяет повысить объективность интегральной оценки необходимости мероприятий по безопасности и найти баланс между расходами на безопасность и достигнутым уровнем безопасности. Методология применена к энергоблоку №5 Запорожской АЭС, что позволило выявить скрытые дефициты и избыточные запасы безопасности, а также предложить новые критерии безопасности для использования в нормах, правилах и стандартах по ядерной и радиационной безопасности.

Ключевые слова: дефицит безопасности, безразмерное значение запаса безопасности, детерминистический критерий безопасности, интегральный дефицит безопасности.

Вступление. На современном этапе развития ядерной энергетики к ней предъявляется всё больше требований в части обеспечения безопасности ядерных энергоустановок, как со стороны традиционных международных организаций, таких как МАГАТЭ или WENRA, так и со стороны общественно-политических организаций и движений, например, Greenpeace. Это приводит к чрезмерному росту затрат из-за завышенных требований по безопасности и снижению конкурентоспособности ядерной энергетики. В такой ситуации представляется важным соблюдение баланса между жёсткими требованиями обеспечения высокого уровня безопасности АЭС и расходами на его поддержание. Для оптимизации мер и мероприятий по безопасности, которые нужно предпринимать в ответ на указанные вызовы для эксплуатируемых АЭС, а также оптимизации расходов на их осуществление, была разработана и успешно применяется, прежде всего в США, концепция принятия решений на основе комплексного риск-ориентированного подхода (ПРКРП или на английском языке IRIDM – Integrated Risk Informed Decision Making), что нашло отражение в выпуске INSAG-25 [1]. В соответствии с этой концепцией предлагается проводить оценку мероприятий по повышению безопасности на основании целого ряда факторов, таких как вероятностный анализ, детерминистический анализ, культура безопасности, опыт эксплуатации, соблюдение норм, правил и стандартов по ядерной и радиационной безопасности, стоимость и т.д.

Эти факторы являются преимущественно качественными, за исключением вероятностного анализа, что отрицательно сказывается на объективности интегральной оценки какого-либо мероприятия по безопасной и/или надёжной эксплуатации АЭС, поскольку основой обоснования безопасности по-прежнему является детерминистический анализ. Для оценки «вероятностного фактора» имеется соответствующий инструмент - вероятностный анализ безопасности (ВАБ) [2], тогда как для оценки остальных факторов формализованная и общепринятая методика их количественной оценки отсутствует.

В статье рассматривается методология количественной оценки такого основополагающего фактора, как «детерминистический». Применение методологии позволяет повысить объективность интегральной

оценки мероприятий и найти баланс между расходами на поддержание безопасности и достигнутым уровнем безопасности, что особенно важно на современном этапе ядерной энергетики Украины.

Цель и задачи. В статье рассматривается методология, направленная на повышение объективности интегральной оценки мероприятий по безопасности АЭС и поиск баланса между расходами на поддержание безопасности и достигнутым уровнем безопасности. Для реализации заявленной цели поставлены и решены следующие задачи:

- введены новые термины и понятия, а также их определения в области оценки безопасности;
- разработана система новых дополнительных показателей безопасности АЭС;
- разработана методология количественной оценки детерминистических запасов безопасности;
- разработаны новые детерминистические критерии запасов безопасности, которые рекомендуются регулирующему органу (РО) в области ядерной и радиационной безопасности;
- применена методология к референтному энергоблоку атомной станции;
- осуществлена интеграция методологии в подход, основанный на интегральной оценке риска.

Теоретические основы методологии. Согласно общепринятого в мире подхода при проектировании и оценке безопасности ядерных установок для их безопасной и надёжной эксплуатации в течение длительного срока в Проекте АЭС, а также нормах, правилах и стандартах по ядерной и радиационной безопасности устанавливаются пределы и условия безопасности, превышение которых означает переход проектного сценария развития аварии в запроектный, в том числе и в тяжёлую аварию. Таким образом, основная задача обеспечения безопасности АЭС при конструировании, проектировании и последующей эксплуатации РУ заключается в том, чтобы для всего спектра учитываемых проектом аварий не происходило превышение пределов безопасности за счёт работы предусмотренных для этого систем безопасности. Для подтверждения факта не превышения пределов безопасности общепринято использовать Анализ проектных аварий (АПА), который в общем случае на основании консервативного подхода даёт ответ «да» или «нет», при этом игнорируя то, какой запас есть у «да», до перехода в «нет». Логично предположить, что чем больше запас, тем безопаснее АЭС.

Анализ проектных аварий является общепризнанным подходом при проектировании и обосновании безопасности реакторных установок, обладает устоявшейся однозначной методологией, процедурой и практикой применения. Для проведения расчётов в рамках АПА разработаны верифицированные и валидированные расчётные теплогидравлические, нейтронно-физические и прочностные программные комплексы с большим опытом их применения.

Безопасность атомных станций обеспечивается за счёт применения [3] системы последовательных физических барьеров, которая включает топливную матрицу, оболочку твэла, границу контура теплоносителя реакторной установки и герметичное ограждение реакторной установки.

Каждому физическому барьеру соответствует свой уникальный набор критериев приемлемости, которые устанавливаются в проекте и нормах, правилах и стандартах по ядерной и радиационной безопасности. Всего существует 7 критериев приемлемости, имеющих разную физическую природу (это может быть энтальпия топлива, температура, давление, эквивалентная доза и т.п.) и используемых в АПА в качестве пределов безопасности. При выполнении АПА расчётным путём определяется консервативное значение параметра, характеризующего критерий приемлемости. Как видно из рисунка 1 между консервативным значением и критерием приемлемости всегда есть зазор, т.к. при превышении критерия приемлемости эксплуатация атомной станции запрещена.

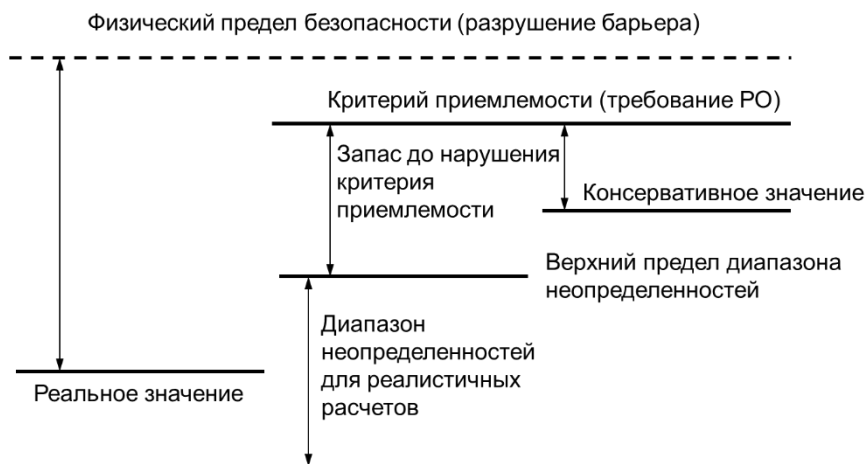


Рисунок 1 – Соотношение между физическим барьером безопасности, критерием приемлемости и расчётными значениями на основании консервативного и реалистичного подходов.

Простое оперирование численными значениями таких зазоров при принятии решений по вопросам безопасности затруднено из-за разной физической природы критериев приемлемости и существенного расхождения их численных значений. Для решения этой проблемы предлагается введение безразмерных показателей, что позволяет разработать систему новых показателей безопасности, сравнивать между собой по степени защищённости различные исходные события аварий, физические барьеры безопасности, критерии приемлемости, определять профили и балансы безопасности, а также сравнивать между собой разные атомные станции по уровню безопасности.

Такая система требует разработки нового понятийного аппарата, для чего предлагаются термины и определения, изложенные ниже.

Запас безопасности – запас между установленным в нормативных или проектных документах значением, характеризующим безопасность АЭС (пределы и критерии безопасности) и расчётным значением, отражающим реальное состояние безопасности АЭС (см. рисунок 1).

Такое определение запаса безопасности соответствует общепринятому [4].

Дефицит безопасности – отношение между установленным в нормативных или проектных документах значением, характеризующим безопасность АЭС (пределы и критерии безопасности) и расчётным значением, отражающим реальное состояние безопасности АЭС, выраженное в долях или процентах. Математически это можно описать следующим образом:

$$D_i = R_i/K_i \text{ или } D_i = (R_i/K_i) * 100\% \quad (1)$$

где D_i – дефицит по безопасности для i -го критерия приемлемости;

R_i – расчётное значение i -го критерия приемлемости;

K_i – значение для i -го критерия приемлемости.

Для удобства в данной статье будем называть значение, которое устанавливается в нормативных или проектных документах граничным значением дефицита безопасности, когда оно выражено в безразмерной форме. Граничное в смысле того, что его превышение будет означать нарушение предела безопасности (критерия приемлемости). Из определения следует, что граничное значение дефицита безопасности всегда равно «1» и соответственно, дефицит безопасности должен быть меньше единицы.

При таком подходе безразмерное значение запаса безопасности или безразмерный запас безопасности будет выглядеть как

$$Z_i = 1 - D_i \quad (2)$$

Для удобства понимания приведенные определения проиллюстрированы на рисунке 2.

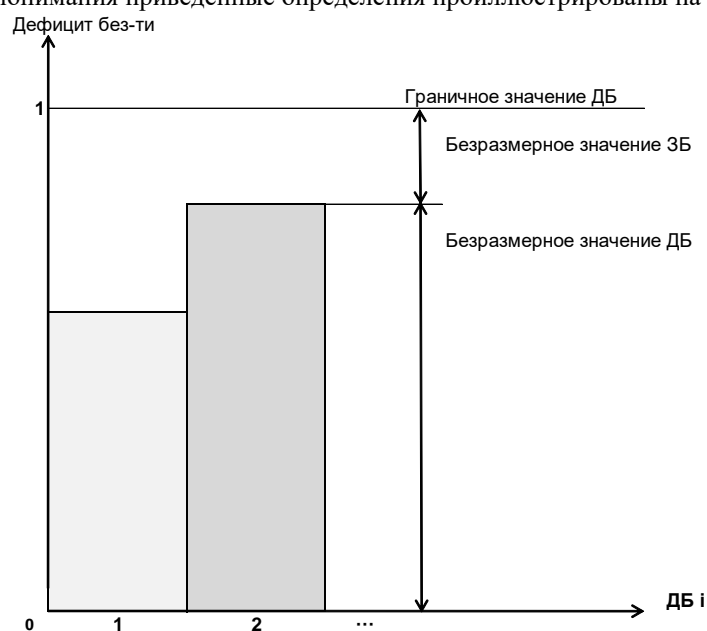


Рисунок 2 – Дефицит безопасности, безразмерный запас безопасности, граничное значение дефицита безопасности

Введение безразмерных величин открыло широкие возможности по реализации этого подхода в виде методологии и процедур, но для этого необходимо ввести ещё ряд понятий.

Предельно допустимое значение дефицита безопасности – это установленное в нормах, правилах и стандартах значение дефицита безопасности, превышение которого запрещает эксплуатацию реакторной установки или требует применения компенсирующих мероприятий. Например, в данной работе предлагается использовать значение 0.9 (т.е. сниженное на 10% граничное значение дефицита безопасности, что обеспечивает 10% безразмерный запас безопасности).

Интегральный дефицит безопасности энергоблока - суммарное значение дефицитов безопасности, определённых на основании детерминистического подхода для всех исходных событий (однако, отдельно для нарушений нормальной эксплуатации и проектных аварий), состояний энергоблока, по отношению ко всем критериям приемлемости и характеризующее безопасность конкретной АЭС.

$$D^i = \sum \sum D_{ij}, \quad (3)$$

i – индекс критерия приемлемости;

j – индекс исходного события.

Интегральный дефицит безопасности также может быть введен в практику регулирующего органа. Например, можно ввести регуляторное требование, когда значение интегрального дефицита безопасности энергоблока не может быть больше, чем количество всех оцениваемых запасов безопасности конкретной АЭС умноженное на 90% или 0.9. Такой интегральный дефицит безопасности можно назвать предельным интегральным дефицитом безопасности. Понятно, что для однотипных реакторных установок значения интегрального дефицита безопасности должны быть близки. При этом, чем меньше интегральный дефицит безопасности, тем выше уровень безопасности. При сравнении разнотипных реакторных установок, например, кипящих и с водой под давлением водо-водяных реакторов предпочтение с точки зрения эффективности-безопасность должно отдаваться той реакторной установке, для которой значение интегральной оценки меньше, с учётом применимых пределов и критериев безопасности.

Интегральный дефицит безопасности физического барьера - суммарное значение дефицитов безопасности, определённых на основании детерминистического подхода для конкретного физического барьера безопасности с учётом всех применимых к нему критериев приемлемости и исходных событий.

Среднее значение дефицита безопасности – среднее арифметическое дефицитов безопасности **рассчитанное** по отношению к исходному событию, физическому барьеру безопасности, критерию приемлемости.

$$D^{cp}_i = D^i / (N_{ij}), \quad (4)$$

где N_{ij} – это количество ИС для которых рассчитывался i -й критерий приемлемости.

С одной стороны, среднее значение дефицита безопасности дублирует интегральный дефицит безопасности, т.к. также является индивидуальной характеристикой безопасности. Однако, с другой стороны, является более универсальным инструментом для проведения сравнений между уровнями безопасности отдельных исходных событий, физических барьеров безопасности, критериев приемлемости, вплоть до сравнения безопасности различных реакторных установок, в том числе, разного типа, т.к., например, не зависит от количества ИС, рассмотренных в проекте, от количества критериев приемлемости, учитываемых для конкретного исходного события, и т.д.

Профиль безопасности – отображённые на единой шкале значения дефицитов безопасности конкретного энергоблока.

Позволяет визуально оценить сбалансированность безопасности и определить те исходные события и дефициты безопасности, которые избыточны или недостаточны по отношению к остальным исходным событиям или дефицитам безопасности.

Детерминистический критерий безопасности - установленный в нормативных документах минимальный запас до граничного значения дефицита безопасности, при нарушении которого эксплуатация АЭС требует выполнения специальных мероприятий по повышению безопасности или недопустима. Предлагается ввести 10% значение минимального запаса (см. рисунок 3).

Детерминистический показатель безопасности – один из описанных выше показателей: дефицит безопасности, безразмерный запас безопасности, интегральный дефицит безопасности, среднее значение дефицита безопасности, баланс и профиль безопасности.

Управление запасами безопасности – это такие целенаправленные изменения эксплуатационных характеристик АЭС и/или других аспектов влияющих на безопасность АЭС, которые предназначены для оптимизации расходов на эксплуатацию при условии поддержания достигнутого высокого уровня безопасности АЭС.

Таким образом, имеющимися запасами безопасности можно осмысленно управлять с целью получения максимальной экономической эффективности, при этом, не допуская снижения высокого достигнутого уровня безопасности.

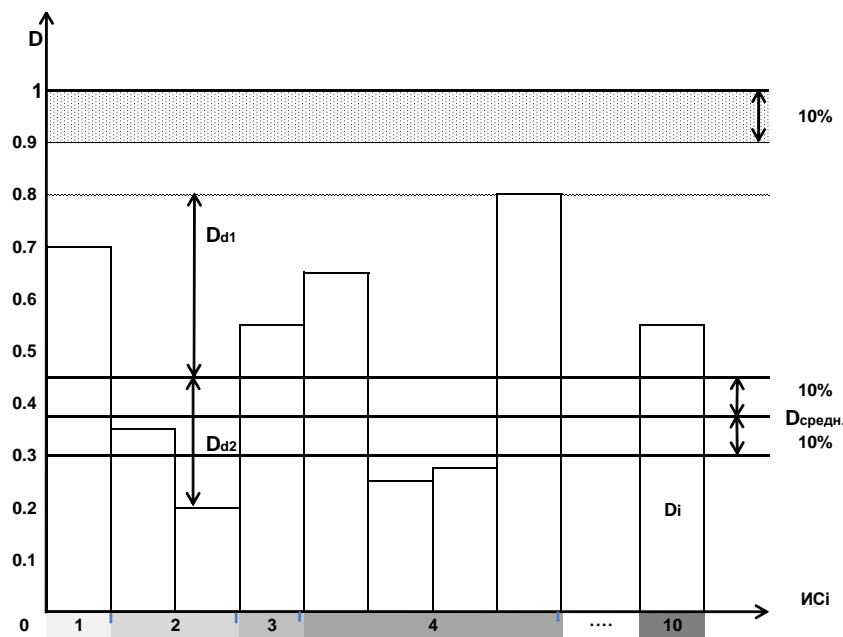


Рисунок 3 – Иллюстрация к детерминистическому критерию безопасности

Практическое применение методологии. В АПА критерии приемлемости устанавливаются для каждого физического барьера на основании нормативных и проектных документов:

1. Запас до кризиса теплообмена с учетом 95% доверительной вероятности, должен быть больше 1.0; номинальное значение – 3; эксплуатационный предел – 1.19.

2. Максимальная температура топлива: 2840⁰С для свежего и 2570⁰С для выгоревшего топлива; номинальное значение – 1600 0С; эксплуатационный предел – 1690 0С.

3. Максимальная радиально усредненная энтальпия топлива: 963 кДж/кг (230 ккал/кг) для свежего 840 кДж/кг (200 ккал/кг) для выгоревшего топлива в любой точке вдоль оси ТВЭЛ; номинальное значение – 100 ккал/кг.

4. Давление в оборудовании и трубопроводах не должно превышать рабочее давление) на 15% с учетом динамики переходных процессов и времени срабатывания предохранительной арматуры

- 207 кг/см²; номинальное значение – 160 кг/см²; эксплуатационный предел – 162 кг/см².
- 92 кг/см²; номинальное значение – 60 кг/см²; эксплуатационный предел – 64 кг/см².

5. Требования к обеспечению целостности ГО (максимальные температура и давление среды в помещениях ГО:

- 150 ⁰С; номинальное значение – 60 ⁰С; эксплуатационный предел – 90 ⁰С.
- 5 кг/см² (0.49 МПа); номинальное значение – 0.85 кг/см²; эксплуатационный предел – 1.03 кгс/см².

6. Максимальный проектный предел повреждения твэлов:

• температура оболочек твэлов — не более 1200⁰С; номинальное значение – 340 ⁰С; эксплуатационный предел – 350 ⁰С.

• локальная глубина окисления оболочек твэлов — не более 18% от первоначальной толщины стенки;

- доля прореагировавшего циркония — не более 1% его массы в оболочках твэлов.

7. Максимальная величина радиоактивных выбросов: на границе санитарно-защитной зоны и за ее пределами, не должны превышать установленных пределов:

- 0.3 Зв (30 бэр) на щитовидную железу детей за счет ингаляции; и
- 0.1 Зв (10 бэр) на все тело за счет внешнего облучения.

За исключением 1-го и 4-го критериев приемлемости все остальные представляют собой максимально допустимые величины, превышение которых означает разрушение физического барьера безопасности. Первые два критерия приемлемости устанавливаются для нарушений нормальной эксплуатации и являются более жесткими, тогда как остальные устанавливаются по отношению к

проектным авариям. Поэтому, в диссертационной работе все исходные события анализируются для каждой категории ИС по отдельности.

Взяты из Анализа проектных аварий референтного энергоблока с серийным реактором ВВЭР-1000/320 Запорожской АЭС [5] (в стране эксплуатируется 11 таких реакторных установок) значения запасов до нарушения критериев приемлемости, в результате пересчёта по формуле 1 переводятся в безразмерную форму. Также, по формуле 1 в безразмерную форму можно перевести и соответствующие параметры для нормальной эксплуатации, эксплуатационные пределы, а пределы безопасной эксплуатации в этом случае будут равны 1 (см. таблицу 1).

Таблица 1 – Перевод номинальных параметров и эксплуатационных пределов в безразмерную форму.

Критерий №	Номинальный параметр		Эксплуатационный предел	
	Измеряемое или расчётное значение	Безразмерная форма	Измеряемое или расчётное значение	Безразмерная форма
1	2	3	4	5
Критерий 1	3	3	1,19	0,840
Критерий 2	1600		1690	0,658
Критерий 3				
Критерий 4	160/64	0,773/0,696	166/68	0,806/0,747
Критерий 5	60/0,85	0,4/0,17	90/1,03	0,6/0,206
Критерий 6	330	0,275	350	0,292
Критерий 7			Формулируется по отношению к активности т/н 1-го контура	

Такой подход позволяет оценить их соотношение, как в рамках анализируемого критерия приемлемости, так и путём сравнительного анализа их соотношения между различными критериями приемлемости, что позволит сделать важные выводы в части надёжности и безопасности реакторной установки.

Согласно таблицы 1, для большей части критериев приемлемости (они же граничные дефициты безопасности) имеются соответствующие эксплуатационные пределы. Обращает на себя внимание тот факт, что разница между критерием приемлемости (равным 1 в безразмерной форме) и эксплуатационными пределами в безразмерной форме различна у разных критериев приемлемости. Для одних она мала (малый запас), например для критерия 1 разница равна 0.16, а для критерия 6 в несколько раз больше – 0.708.

При конструировании и проектировании реакторных установок на этот момент необходимо обратить внимание и объяснить такие различия, которые могут быть вызваны, например, различием и динамикой физических процессов, свойств материалов или же действительно следствием несбалансированного подхода при проектировании.

При анализе любого исходного события могут применяться несколько критериев приемлемости. Поэтому, интегральный дефицит безопасности по отношению к j-ому ИС должен рассчитываться как сумма дефицитов по всем критериям приемлемости:

$$D_{исj}^t = \sum D_i, \quad (5)$$

i – индекс критерия приемлемости;

j – индекс исходного события.

Аналогично можно рассчитать интегральный дефицит для каждого физического барьера безопасности по отношению к каждой из категорий ИС (нарушения нормальной эксплуатации угрожают целостности только 2-го и 3-го физических барьеров безопасности при проектном протекании):

$$D_n^t = \sum \sum D_{ij}, \quad (7)$$

где j включает только те исходные события, которые угрожают целостности физического барьера безопасности, а n – номер физического барьера безопасности, т.е. принимает значения 1, 2, 3, 4.

Представленные выше теоретические основы методологии позволяют решать следующие практические задачи:

- рассчитать безразмерные запасы и дефициты безопасности для исходных событий,
- оценить средние и интегральные значения дефицитов безопасности как для критериев приемлемости и физических барьеров безопасности, так и энергоблока АЭС в целом, и оценить детерминистически уровень безопасности энергоблока.
- выполнить сравнительный анализ степени защищённости по отношению к критериям приемлемости и физических барьеров безопасности,
- рассчитать балансы дефицитов безопасности и построить профиль дефицитов безопасности
- выявить дефициты безопасности и избыточные запасы безопасности.

Прежде, чем продолжить освещение применения методологии на практике, необходимо дать некоторые краткие пояснения по философии и концепции безопасности АЭС.

Согласно ОПБАС-2008 [2] система последовательных физических барьеров включает: топливную матрицу, оболочку твэла, границу контура теплоносителя РУ, герметичное ограждение РУ и биологическую защиту.

Последний физический барьер применяется для источников ионизирующего излучения и в рамках данной работы применительно к АЭС не рассматривается.

Каждому физическому барьеру соответствует не один критерий приемлемости, а свой уникальный набор критериев приемлемости и, таким образом, дефициты безопасности позволяют оценить степень защищённости и сбалансированность защиты по отношению к каждому физическому барьеру индивидуально, как для каждого исходного события по отдельности, так и их совокупности, что является новаторским решением.

Для 1-го физического барьера в рамках АПА рассчитываются критерии приемлемости № 2 и 3. Для 2-го ФББ – критерий № 6. Для 3-го ФББ – критерий № 4 и для 4-го физического барьера критерии № 5 и 7.

Зная, какие критерии применяются к каким ФББ, для каждого физического барьера безопасности можно рассчитать интегральное значение и среднее значение дефицита безопасности (см. формулы 3 и 4).

Очевидно, что существуют предельные значения для интегрального значения дефицита безопасности, которое определяется количеством исходных событий и критериев приемлемости, рассчитываемых для ФББ. Отсюда следует важный вывод, что можно ввести регулирующие требования по безразмерным запасам безопасности физических барьеров безопасности по отношению к типам реакторных установок, т.е. установить минимальные значения, превышение которых не допускаются или требуют проведения специальных компенсирующих мероприятий.

Интегральный дефицит безопасности для ФББ №1 равен 3,741, для ФББ №2 - 3,722, для ФББ №3 - 10,526 и для ФББ №4 - 4,973. Анализ профиля дефицитов безопасности (см. Рисунок 4) показывает существенное различие в уровне защищённости физических барьеров безопасности и разбалансированный профиль безопасности. Наиболее защищённой является оболочка твэлов. Данная информация является важной при проектировании РУ и её систем безопасности. Необходимо применять такие решения, чтобы степень защищённости ФББ №3 и 4 была выше, а профиль безопасности для физических барьеров – более сбалансированным.

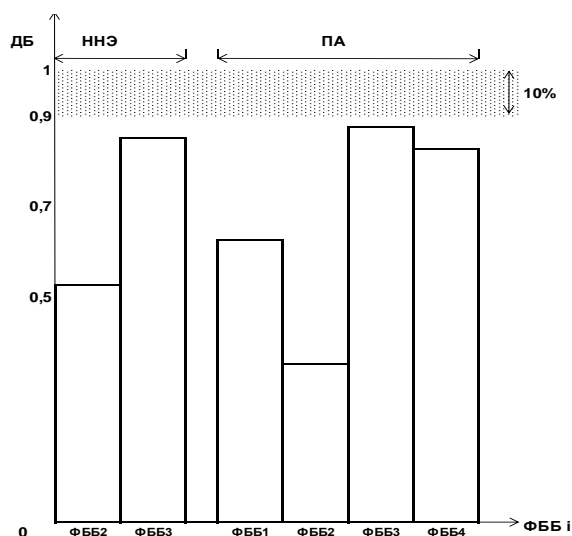


Рисунок 4 – Среднее значение запаса безопасности физического барьера безопасности по исходным событиям (ННЭ и ПА) и критериям приемлемости

Выводы. Предлагаемая методология может применяться самостоятельно при решении задач по проектированию, модернизации и реконструкции для повышения надёжной и безопасной эксплуатации АЭС, а также в составе методологии принятия решения основанного на комплексном риск-ориентированном подходе [6], тем самым решая проблему дополнения показателей риска детерминистическими показателями для принятия более обоснованных решений.

Методология может использоваться проектными и конструкторскими организациями, регулирующим органом по ядерной и радиационной безопасности, эксплуатирующими организациями, а также организациями научной и технической поддержки по эксплуатации и безопасности АЭС.

Методология имеет потенциал и для дальнейшего развития. Уже сейчас видны следующие направления:

- Разработка единого критерия безопасности АЭС на основе вероятностного и детерминистического критериев безопасности;
- Разработка программного продукта для отслеживания текущего уровня безопасности на основе детерминистических показателей в режиме реального времени.

Список использованной литературы

1.INSAG-25, Структура процесса принятия решений на основе комплексного риск-ориентированного подхода, МАГАТЭ, Вена, 2014г., STI/PUB/1499, ISBN 978–92–0–406814–6, ISSN 1025–2193.

2.НП 306.2.141-2008. Загальні положення забезпечення безпеки атомних станцій. К.: Державна адміністрація ядерного регулювання України, 2008.

3.International Atomic Energy Agency, Development and Application of Level 1 Probabilistic Safety Assessment for Nuclear Power Plants, IAEA Safety Standards Series No. SSG-3, IAEA, Vienna (2010).

4.International Atomic Energy Agency, Safety Assessment for Facilities and Activities, IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 4, IAEA, Vienna (2009).

5.Отчет по анализу безопасности. Анализ проектных аварий. Блок 5 Запорожская АЭС. 21.5.70.ОБ.02., 2003г.

6.International Atomic Energy Agency, Safety Standard, Integrated Risk Informed Decision Making Process Guidance, IAEA-TECDOC DS 365 Draft 1, IAEA, Vienna, April 2008.

Ev. Pysmennyy, Dr. Eng. Science, Prof.
S. Klevtsov, Prof. assistant

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

METHODOLOGY OF THE RESEARCH OF DETERMINISTIC SAFETY MARGINS OF NUCLEAR POWER PLANTS

Article provides methodology that on a basis of deterministic approach allows evaluate safety margins and safety level for Nuclear Power Plant, as well as for each physical safety barrier. These could be performed by independent implementation of the methodology or in the framework of Integrated Risk-Informed Decision Making approach.

As a tool for deterministic approach and safety margins calculation the Design Basis Accident (DBA) Analysis was applied. The main objective of DBA analysis is to demonstrate based on conservative approach exceeding or non-exceeding of so called acceptance criteria that are established and justified in the NPP design. Since, acceptance criteria have different physical background, units and numerical values it is proposed to transform them into unitless form by dividing value of corresponded calculated parameter on value of acceptance criterion. The result of ratio is the unitless safety deficit while difference between the unitless acceptance criterion (that is always equal to 1) and safety deficit is the unitless safety margin.

This allows evaluate for each initiating event the safety deficits for each acceptance criterion. Introduction of the average and integrated safety deficit makes possible to perform comparative analysis between different initiating events, acceptance criteria, physical protection barriers and types of nuclear reactors.

Also, it is proposed to establish for each acceptance criterion a 10% zone (corresponds to 0.9 value limiting safety deficit) as a deterministic safety criterion and apply it in the nuclear regulations. If calculated value of safety deficit is within this zone than it is propose to use time limitation and recognize necessity to develop and apply safety measures of decrease of a safety deficit. This allows reveal as safety deficiencies so excessive safety margins.

The proposed methodology was applied for DBA Analysis of Zaporizhzhya NPP unit 5. Safety deficits were evaluated for each initiating event and corresponded safety profiles were draw for each acceptance criterion. Methodology is recommended for usage in regulatory activity, during the NPP designing and operation, and, for optimization of the safety systems maintenance and repair activity and its fulfillment on operating at power reactor.

Key words: safety deficit, integral safety deficit, unitless safety margin, deterministic safety criteria.

References

1. INSAG-25, A Framework for an Integrated Risk Informed Decision Process, IAEA, Vienna, 2014, STI/PUB/1499, ISBN 978-92-0-406814-6, ISSN 1025-2193.
2. NP 306.2.141-2008. General Safety Provisions for Nuclear Power Plants. Kyiv: State Nuclear Regulatory Administration of Ukraine, 2008.
3. International Atomic Energy Agency, Development and Application of Level 1 Probabilistic Safety Assessment for Nuclear Power Plants, IAEA Safety Standards Series No. SSG-3, IAEA, Vienna (2010).
4. International Atomic Energy Agency, Safety Assessment for Facilities and Activities, IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 4, IAEA, Vienna (2009).
5. Safety Analysis Report. Design Basis Accident Analysis. Unit 5 of Zaporizhzhya NPP. 21.5.70.ОБ.02., 2003.
6. International Atomic Energy Agency, Safety Standard, Integrated Risk Informed Decision Making Process Guidance, IAEA-TECDOC DS 365 Draft 1, IAEA, Vienna, April 2008.

Є.М.Письменний, д-р техн. наук, проф., ORCID 0000-0001-6403-6596

С.В. Клевцов, ассистент, ORCID 0000-0003-14055048

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» МЕТОДОЛОГІЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ДЕТЕРМІНІСТИЧНИХ ЗАПАСІВ БЕЗПЕКИ АТОМНИХ СТАНЦІЙ

На сучасному етапі розвитку ядерної енергетики до неї ставиться все більше вимог з забезпечення безпеки ядерних енергоустановок, як з боку традиційних міжнародних організацій, таких як МАГАТЕ або WENRA, так і з боку суспільно-політичних організацій та рухів, що призводить до надмірного зростання витрат, та погіршує її конкурентоспроможність. Для дотримання балансу між жорсткими вимогами забезпечення високого рівня безпеки АЕС та витратами на його підтримку необхідна розробка нових детерміністичних методик, так як існуючі підходи враховують тільки кількісні імовірнісні фактори безпеки. У статті пропонується підхід до кількісної оцінки такого основного фактора безпеки, як «детерміністичний», що дозволяє підвищити об'єктивність інтегральної оцінки заходів з безпеки та знайти баланс між витратами на підтримку безпеки та досягнутим рівнем безпеки. Методологія застосована до енергоблоку №5 Запорізької АЕС, що дозволило виявити приховані дефіцити та надмірні запаси безпеки, та запропонувати нові критерії безпеки для застосування у нормах, правилах та стандартах з ядерної та радіаційної безпеки.

Ключові слова: дефіцит безпеки, безрозмірне значення запасу безпеки, детерміністичний критерій безпеки, інтегральний дефіцит безпеки.

Надійшла 24.04.2018

Received 24.04.2018

V. Prokopenko, Cand. Sc., Prof., ORCID 0000-0002-5518-5802

O. Zakladnoy, Cand. Sc., Prof., ORCID 0000-0003-2813-3692

V. Dielov, Master, ORCID 0000-0003-2827-8998

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

P. Khadka, Master, ORCID 0000-0003-2826-9331

University College of Southeast Norway

MODELING OF OPERATING MODES OF INDUSTRIAL HEATING, VENTILATION AND AIR CONDITIONING

In this work elaborated model of heating, ventilation and air conditioning (HVAC) system, carry out simulation of different modes of operating, assessment and optimization of consumption electric and heat energy. Given understanding and problem of HVAC system as important influence factor on energy demand, also it is need to mention that research in that field requires a lot of knowledge in different fields of science. Due to regression analyses were done to find a model of system to estimate the accuracy in comparison with real HVAC system, it was based on LabView, MATLAB Simulink and OpenModelica simulation tools. This work consider HVAC system, development from system a model which basically can be described by internal elements like fan, heater, air piping and etc. Also it will be found new strategies to achieve optimal regulation for such system, which allow to confirm the best decision depending on multivariable changing dynamic model.. Introduced and considered standard feedback system built on PI controller. Simulation results show possibility of significant energy savings and comfort enhancement using the proposed strategy at different operation modes. Carried out economic assessment of modified technology implemented in PI controller like part of start-up project. Develop recommendations in exploitation of such systems. The results can be utilized to estimate the energy demand for HVAC system at different times of year, which would contribute to improving the accuracy of prediction automatic devices.

Keywords: heating, ventilation, conditioning, HVAC systems, optimization of modes of operation, energy saving, energy efficiency.

Introduction Energy saving in the company begins with a clear understanding of the leadership of the need to improve the economic performance of the company due to lower energy consumption per unit of production. Ventilation and air conditioning is a significant component of the overall balance of FER consumption, which accordingly requires attention to energy conservation and energy efficiency, as these consumers have significant potential for energy conservation.

Recently, with the adoption of new standards for climatic conditions inside industrial and other buildings, in the future more and more ventilation (HVAC) systems will be installed. Very often ventilation units operate in constant mode with the maximum power, when it is not even necessary, and the presence of automation on this equipment is very rare.

Often, ventilation units operate with variable environmental characteristics, with a probable distribution of pressure, temperature and air flow, the design of such systems usually occurs in stationary conditions of the environmental parameters. Therefore, there is a need to identify the optimal modes of operation when changing the load characteristics.

Formulation of the problem Due to the further increase in the number of ventilation (HVAC) systems and the increase in air regulation, there is an urgent need to optimize the operating modes of ventilation equipment. Electricity consumption by ventilation units is significant as most of the latter are outdated and operate not in energy-efficient modes. On the basis of the simulation of the installation it is possible to identify the most rational modes for one or another type of load using the methods of forecasting power consumption and its adjustment by means of automation.

Analysis of recent research Mostly all scientific works which are dedicated to optimization of different types of HVAC systems were carry out by foreign publications, basically it based on developing models both static and dynamic for commercial building sector (Yohei Yamaguchi, Yusuke Miyachi), imperial modelling and gradient projection optimization (V. Vakiloroaya, B. Samali), additionally considered influence of natural ventilation with HVAC system (Raad Z. Homod, Haider A.F. Almurib)

Purpose and objectives The purpose of the research is developing a model of the ventilation installation, modeling the operating modes of the installation for different types of load (constant and alternating), which has uncertainty and requires different methods for predicting energy consumption. The objective of the study is to

identify the optimal mode of operation of the installation based on the use of automation (controller) for prediction of consumption and management of the installation.

Materials and methods The methods used are based on a correlation-regression analysis, which allows to determine the most important factor characteristics, also for modeling were used OpenModelica software, LabView software and methods from the general theory of optimization and decision-making theory were used.

Main research material The major components considered in the system model are: an air-conditioned room of industrial unit and air-handling unit (AHU), which consists of a fan, cooling and dehumidifying coil, heating coil, humidifier, filter and air-piping. Simple HVAC model block diagram can be observed in figure 1 and simulation model in figure 2.

In summer operation season, hot and humid air enters the cooling and dehumidification coil in the AHU. The air temperature reduces when air goes through coil and water vapour is condensed, which produces an effect in decreasing relative humidity. In the zone, the thermostat senses the temperature of the zone and gives signal to the controller unit to produce input to the chiller to change flow rate of water supplied to the cooling coil. For winter season of operating, often dry and cold air goes in the AHU. The sensor senses the temperature in main space and sends a signal to the controller, which uses the error signal to control the input temperature of the water flows through the heating coil.

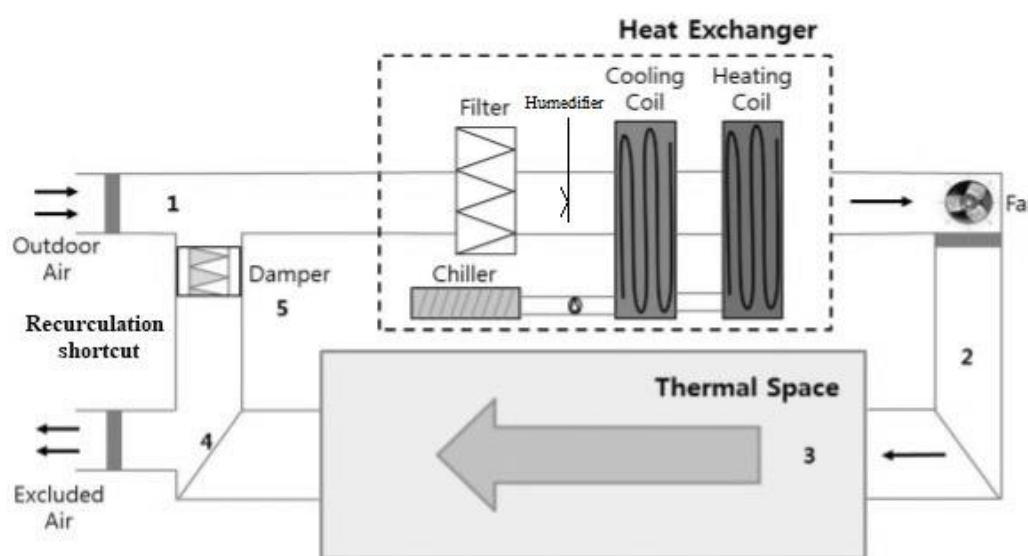


Figure 1 - Simple block diagram of conventional HVAC system

In industrial application of such systems in many cases we have some pollutant in main working area and we have limitation on the concentration of pollutant due to sanitary hygiene requirements. Also pollutant mass flow can be represented as some function of time during the working day and can be approximated by experimental data. If we assume that in room (figure 1 - thermal space) present some source of pollution (p) with mass flow rate like generation $\dot{m}_{p,g}$ and air in room is homogeneous mixture (perfect mixing), so that the zone temperature distribution is uniform and the dynamics of the zone can be expressed in simple capacity we have such equation (1) for mass balance of pollutant:

$$\frac{dm_p}{dt} = \dot{m}_{p,in} - \dot{m}_{p,out} + \dot{m}_{p,g} \quad (1)$$

where m_p - mass of pollutant in room, kg; $\dot{m}_{p,in}$ - inflow air with some amount of pollutant, kg/s; $\dot{m}_{p,out}$ - effluent air with pollutant, ks/s; $\dot{m}_{p,g}$ - generation of pollutant in air in room, kg/s.

Also mass balance law for pollutant can be rewritten in terms of parameter of air:

$$\frac{dm_p}{dt} = \dot{V}_{air,in} \cdot (c_{p,in} - c_{p,out}) + \dot{m}_{p,g} \quad (2)$$

where $\dot{V}_{air,in}$ - inflow volume of air in room, m³/s; $c_{p,in}$ - concentration of pollutant in inflow air, mole/m³ of pure air; $c_{p,out}$ - concentration of pollutant in effluent air, mole/m³ of pure air.

At steady state $\frac{dm_p}{dt} = 0$ condition eq.2 can be also written in such way:

$$\dot{V}_{\text{air,in}} = \frac{\dot{m}_{p,g}}{M_p c_{p,r}} \quad (3)$$

where M_p - molar mass of pollutant, kg/mole; $c_{p,r}$ - concentration of pollutant inside in the room equal to $c_{p,\text{out}}$, mole/m³.

For heating air by using heater based on hot water which given by eq.(3) (it was neglected heat losses to environment due to small value and assumed high heat conductivity of tubes so thermal resistance neglected). Also heat transfer coefficient for convection assumed to be constant value because of low speed changes of air flow as result of controlling fan's speed of rotating :

$$\dot{Q}_H = \hat{c}_{\text{air}} \dot{m}_{\text{air}} (T_r - T_{\text{out}}) \cdot (1 - \eta_{\text{rec}}) = \alpha_{\text{HE}} (T_{\text{tube}} - T_{\text{in}}) A_{\text{HE}} \quad (4)$$

where \dot{Q}_H - heat transfer by heat exchanger, kW; H_{air} - enthalpy of air at selected moment of time, kJ; \hat{c}_{air} - specific heat capacity of air, kJ/kg; \dot{m}_{air} - mass flow of air in heat exchanger and out, kg/s; $T_{\text{out}}, T_{\text{in}}$ - inflow and outflow temperature of air, °C; α_{HE} - heat transfer coefficient for convection, kW/(°C m²); A_{HE} - heat transfer area of heat exchanger, m².

Under the above assumptions, heat balance equations of the zone are:

$$\hat{c}_{\text{air}} m_{\text{air,r}} \frac{dT_r}{dt} = \dot{V}_{\text{air,in}} \rho_{\text{air}} \hat{c}_{\text{air}} (T_{\text{in}} - T_r) - \sum U_i \cdot A_i (T_r - T_i) + q(t) \quad (5)$$

$$\hat{c}_w m_w \frac{dT_w}{dt} = U_w A_w (T_r - T_w) - U_w A_w (T_w - T_{\text{out}}) \quad (6)$$

$$\hat{c}_{\text{roof}} m_{\text{roof}} \frac{dT_{\text{roof}}}{dt} = U_{\text{roof}} A_{\text{roof}} (T_r - T_{\text{roof}}) - U_{\text{roof}} A_{\text{roof}} (T_{\text{roof}} - T_{\text{out}}) \quad (7)$$

where $m_{\text{air,r}}$ - mass of air in room (constant value due to assumption that thermal expansion of the air is negligible and inflow and outflow of air is equal), kg; T_r - temperature of air in room, °C; ρ_{air} - density of air assumed to be always constant 1,2 kg/m³; U_i - heat transfer coefficient for heat losses i part of room (wall, roof, infiltration), kJ/(m²*K); A_i - area of i part of the room, m²; T_i - temperature of i part at internal side in the room, °C; $q(t)$ - additional heat flow by another sources (humans, lamps, insolation), kW.

Equation 6 describes the thermal inertia of building by heat capacity of the wall where subscript w means wall and T_{out} is temperature outside of building.

Next part of model is cooling device or refrigerator part also with heat exchanger and be described by cooling cycle (figure 3). For model description was taken R22 as the most common agent for cooling with equation for description:

$$\dot{Q}_C = \dot{m}_{\text{R22}} \cdot \varepsilon \cdot W \cdot (1 - \eta_{\text{rec}}) \quad (8)$$

where \dot{Q}_C - heat flow of cooling the air in heat exchanger of cooling device, kW; \dot{m}_{R22} - mass flow of cooling agent due to work of compressor, kg/s; ε - cooling coefficient; W - specific work of compressor, kJ/kg.

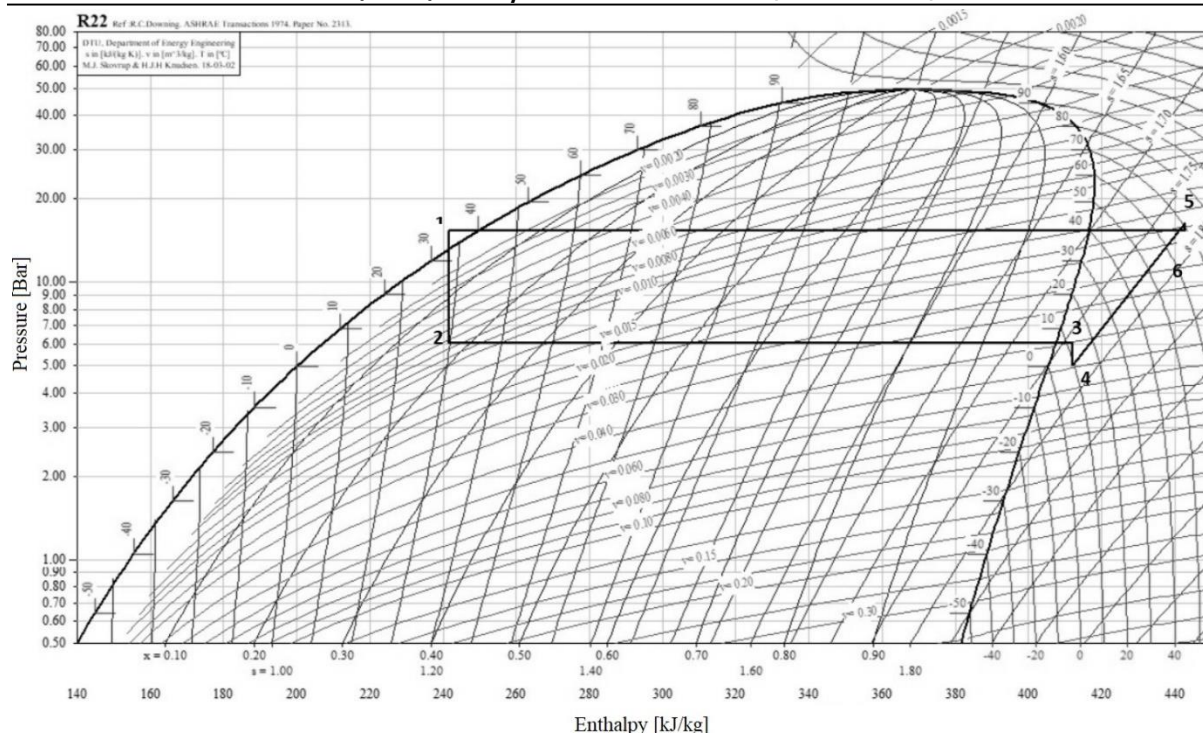


Figure 2 Cooling cycle of air cooling device

In case of using recuperation we have the heat transfer of air streams in air-conditioning system and we assumed that it occurs under steady and adiabatic conditions and without frictional losses. So as was mentioned that inflow $\dot{V}_{air,in}$ and outflow $\dot{V}_{air,out}$ of air in the room is the same value:

$$\dot{V}_{air,in} = \dot{V}_{air,out} \quad (9)$$

The fan's power consumption at not steady state conditions can be approximated as regression equations for absolute value of pressure $p_v(\dot{V}_{air,in})$ and efficiency coefficient for fan $\eta_v(\dot{V}_{air,in})$ under some interval allowable $\dot{V}_{air,in}$ values, so basically it is enough to use 2nd order regression equations (coefficients a can be evaluated due to least square method) to evaluate power consumption of fan:

$$\dot{W}_v = \frac{(a_0 + a_1 \cdot \dot{V}_{air,in} + a_2 \cdot (\dot{V}_{air,in})^2) \cdot \dot{V}_{air,in}}{a_3 + a_4 \cdot \dot{V}_{air,in} + a_5 \cdot (\dot{V}_{air,in})^2} \quad (10)$$

where $0,15 \cdot \dot{V}_{air,max} < \dot{V}_{air,in} < \dot{V}_{air,max}$.

Firstly, it was modeled the simplified model without any automatic devices at winter condition with temperature of the outside air at -1 °C, with rate of heating the outdoor air calculated from heat losses at -1 °C with constant air flow and respectively constant heat flow. The result of simulation for simplified model was done at OpenModelica tool (Figure 3) to find model correctly developed and verified what a time constant for building (room) is.

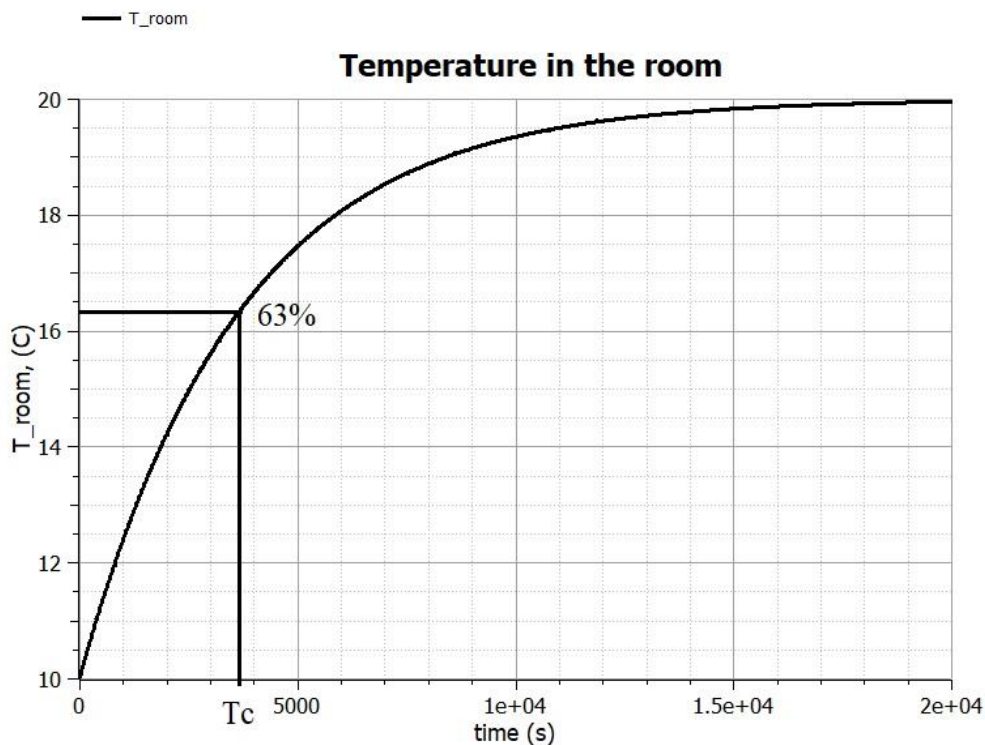


Figure 3 - Change of the temperature in the room with initial condition 10 °C with outdoor temperature -1 °C with simulation in OpenModelica tool

More complicated case was studied in MATLAB with meaning of more dynamic model with setting parameters of model to be a function of time or some circumstances (figure 4).

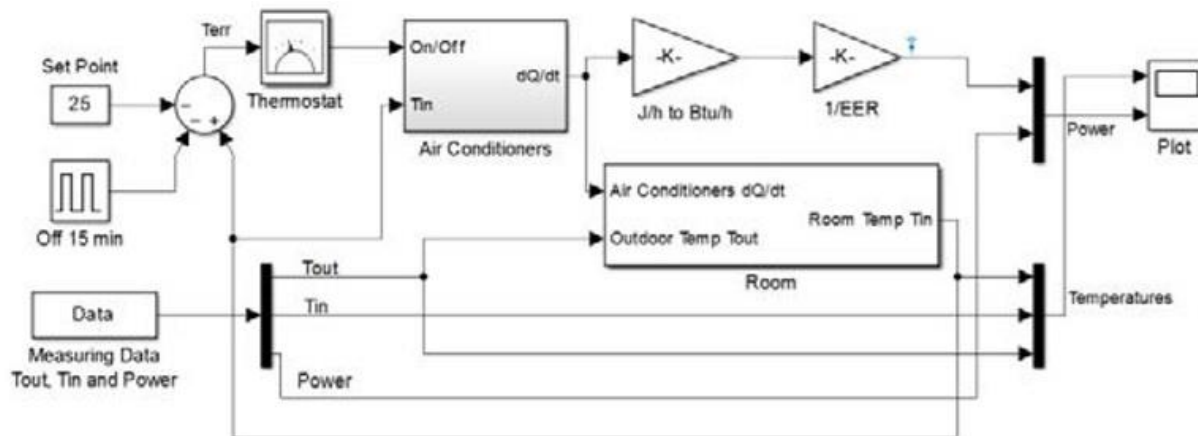


Figure 4 - Mathematical model of HVAC system in MATLAB

After curve fitting in MATLAB of experimental data we get next figure 5 for $p_v(\dot{V}_{air,in})$ and $\eta_v(\dot{V}_{air,in})$ accordingly.

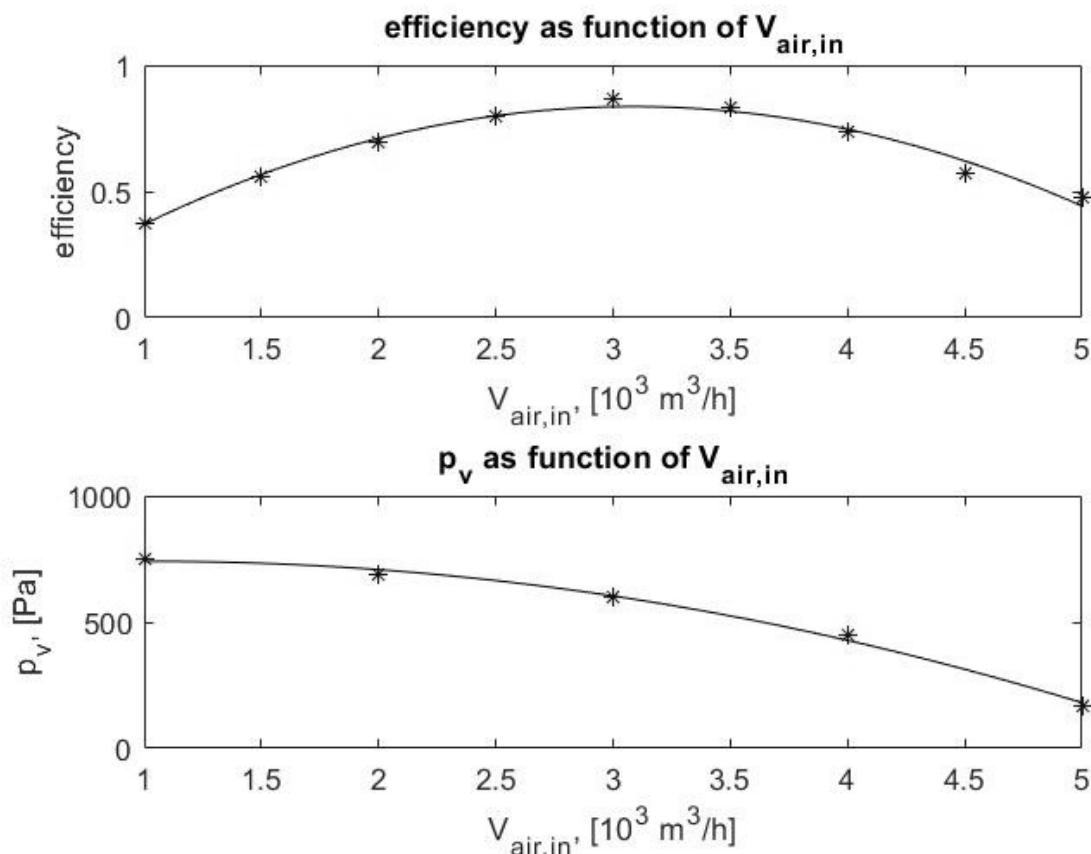


Figure 5 - Polynomial values of ventilator efficiency and pressure from regression approximation in comparison with experimental data

The result of simulation simple HVAC model is used to approximate energy required for cooling thermal space (room) at temperature set point 25 °C (Table 1).

Table 1 - Comparison between the model simulation result and measurement results at 25 °C during time interval 120 min.

	Measured values			Simulated values		Differences	
	$T_{out,av}$ (°C)	$T_{in,av}$ (°C)	Energy (kWh)	$T_{in,av}$ (°C)	Energy (kWh)	$T_{in,av}$ %	Energy %
Mode 1	26,5	23,3	11,2	23,2	13,5	0,42	23%
Mode 2	27,1	24,1	11,7	24,6	12,8	2,07	13%
Differences	2,2%	3,3%	2,6%	5,6%	5,34%		

Conclusions In this paper, we have addressed the modelling and optimization problem of simple HVAC system to target energy savings and verified the proposed approach [3]. By using the monitored data, mathematical models for the set-up components are developed and implemented in a transient simulation of the integrated system operating in various conditions. Results showed that by applying this approach, an air-cooled central cooling plant HVAC system can achieve significant improvements in energy-efficiency and performance, especially in part-load conditions.

References

- [1] ASHRAE, Handbook: Fundamentals, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, inc.,2009.
- [2] Magnussen, J. Increased energy efficiency in buildings using model predictive control, Technical report, Norwegian University of Science and Technology,2005.
- [3] Underwood, C. P. HVAC Control Systems: Modelling, analysis and design, E & FN Spon,1999.

- [4] J. LeBrun, J. -P. Bourdouxhe, M. Grodent, HVAC1 Toolkit: A toolkit for Primary HVAC System Energy Calculation, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 1999.
- [5] A.Pal, R. Mudi, Self-tuning fuzzy PI controller and its applications systems, Int. J. Comput. Cogn. 6 (2008)
- [6] M. Trcka, J.L.M. Hensen, Overview of HVAC system simulation, Autom. Constr., 19 (2010).
- [7] J.A. Orosa, A.C. Oliveira, Software tools for HVAC research, Adv. Eng. Softw., 42 (2011).

УДК 620.9

В.В. Прокопенко, канд. техн. наук, доцент, **ORCID** 0000-0002-5518-5802

О.О. Закладний, канд. техн. наук, доцент, **ORCID** 0000-0003-2813-3692

В. Дєлов, магістр, **ORCID** 0000-0003-2827-8998

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

П. Хадка, магістр, **ORCID** 0000-0003-2826-9331

Університетський коледж Південно-Східної Норвегії

МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ПРОМИСЛОВОГО ОПАЛЕННЯ, ВЕНТИЛЯЦІЇ ТА КОНДИЦІОНУВАННЯ ПОВІТРЯ

У роботі розроблена модель системи опалення, вентиляції та кондиціонування (СВіК), проводяться симуляція різних режимів експлуатації, оцінка та оптимізація споживання електричної та теплової енергії. З огляду на розуміння та проблеми системи вентиляції та кондиціонування як важливого фактору впливу на споживання енергії, також слід зазначити, що дослідження в цій галузі вимагає значних знань у різних галузях науки. Завдяки регресійному аналізу було зроблено пошук моделі системи для оцінки точності у порівнянні з реальною системою СВіК, яка базується на інструментах моделювання LabView, MATLAB Simulink та OpenModelica. У цій роботі розглядається система вентиляції та кондиціонування, визначення меж системи, на основі якої відбувається розробка моделі, яка в основному може бути описана внутрішніми елементами, такими як вентилятор, нагрівач, повітряні трубопроводи тощо. Також буде знайдено нові стратегії для досягнення оптимального регулювання для такої системи, що дозволяє досягти кращих енергетичних показників у залежності від багатоваріантної зміни динамічної моделі. Введена і розглянута стандартна система зворотного зв'язку, побудована на ПІ-контролері. Результати моделювання показують можливість істотної економії енергії та підвищення комфорту, використовуючи запропоновану стратегію в різних режимах роботи. Проведено економічну оцінку використання модифікованої технології, впроваджені в контролері ПІ, як частина старт-ап проекту. Розроблено рекомендації щодо експлуатації таких систем. Результати можуть бути використані для оцінки енергетичного попиту на системи вентиляції та кондиціонування в різні періоди року, що сприятиме покращенню точності автоматичних пристроїв при прогнозуванні енергоспоживання.

Ключові слова: опалювання, вентиляція, кондиціонування, системи кондиціонування повітря, оптимізація режимів роботи, енергозбереження, енергоефективність.

Надійшла 12.04.2018

Received 12.04.2018

ЛІБЕРАЛІЗОВАНІ РИНКИ ЕНЕРГІЇ LIBERALIZED ENERGY MARKET

УДК 631

А.І. Замулко, канд.тех.наук, доц., ORCID 0000-0001-8018-6332

Ю.А. Веремійчук, канд.тех.наук, ст. викл., ORCID 0000-0003-0258-0478

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

ОРГАНІЗАЦІЯ ОБМЕЖЕННЯ СПОЖИВАЧІВ НА РОЗДРІБНОМУ РИНКУ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ : ПРАВОВІ ПИТАННЯ

В статті розглянуто питання законодавчого та нормативно-правового забезпечення щодо надійного функціонування ОЕС України в напрямку застосування заходів з примусового обмеження споживачів електричної енергії. Проаналізовано еволюцію питань запровадження примусових обмежень споживання електричної енергії в період реалізації моделей ринкових відносин в енергетичній галузі. Проведено дослідження умови використання та критеріїв запровадження графіків обмеження та аварійного відключення споживачів. Запропоновано модель запровадження графіків обмеження та аварійного відключення споживачів в умовах функціонування сучасного ринку електроенергії, використання якої можливе в регіональному розрізі в залежності від ситуації та на рівні ОЕС України в цілому. Використання принципів запровадження графіків обмеження може стати підґрунтям для формування системи тарифів на електричну енергію, критеріями диференціації тарифних ставок яких буде надійність електропостачання. Запровадження такої системи тарифів підвищить відповідальність енергетиків за використання графіків обмеження та аварійного відключення споживачів, а споживач стане активним учасником на ринку електричної енергії використовуючи свої можливості для мобільного управління електроспоживанням.

Ключові слова: ринок електричної енергії, обмеження споживання електричної енергії, графіки обмеження, надійність електропостачання

Вступ. Запровадження ринкових відносин в енергетичній галузі на окреме місце ставить питання забезпечення надійності постачання електричної енергії споживачам. Особливо гостро це питання постає в умовах значної зношеності електричних мереж, а також можливих ситуацій, коли вирішення питання постачання електричної енергії лише з використанням ринкових механізмів неможливо.

Враховуючи особливості об'єднаної енергетичної системи (ОЕС) України, її низький рівень інтеграції з енергосистемами сусідніх країн, вирішення питань недопущення та подолання наслідків надзвичайних ситуацій в ОЕС України без залучення споживача до забезпечення надійності електропостачання, а іноді і стабільної роботи усієї енергетичної системи.

Механізмом реалізації в умовах відсутності економічних важелів впливу на споживача на ринку електричної енергії може розглядатися лише примусове обмеження споживача. Тобто, основною причиною запровадження примусових (умовно примусових) обмежень споживачів є порушення балансу виробництва та споживання електричної енергії, зумовленого різними внутрішніми та зовнішніми факторами впливу на діяльність ОЕС України.

Питання ускладняється тим, що наразі в Україні відсутня чітка і зрозуміла концепція управління надійністю електропостачання, яка необхідна для створення важелів впливу з боку споживачів і вирішення питань, пов'язаних із зацікавленістю електропередавальних організацій в підвищенні надійності. А також формування завдань з примусового (неринкового) обмеження споживачів електричної енергії в надзвичайних ситуаціях в енергетичній галузі.

Метою цієї статті є дослідження еволюції питань запровадження примусових та умовно примусових обмежень споживання електричної енергії, правових моделей взаємовідносин, між суб'єктами ринку, що використовувалися на кожному етапі, та формування пропозицій щодо можливостей використання примусових обмежень споживачів електричної енергії, як заходу із забезпечення надійної роботи енергетичної системи України в умовах дії нового ринку електричної енергії при надзвичайних ситуаціях.

Матеріал і результати досліджень

Ринкові відносини, повна господарська і фінансова самостійність підприємств вимагає

впорядкування юридичних і фінансових відносин між суб'єктами ринку, встановлення чітких та прозорих правил взаємодії. Одним з таких питань є забезпечення належного рівня надійності функціонування ОЕС України, які традиційно розглядають у розрізі трьох базових складових, а саме як [1-2]:

- балансову надійність, тобто забезпеченість у будь-який момент часу попиту споживачів на електроенергію необхідними генеруючими потужностями з обов'язковою наявністю нормативних величин їх резервів (надійність балансу енергії та потужності з нормативними величинами резервів первинного, вторинного та третинного регулювання), а також відповідними первинними енергоресурсами (паливом для ТЕС, водою для ГЕС тощо);

- структурну надійність, тобто оцінку тривалості та ймовірності різних станів елементів енергосистеми, за появи яких не забезпечується повне задоволення попиту споживачів на електроенергію;

- режимну надійність, тобто забезпечення роботи електроенергетичного обладнання без порушення припустимих меж основних параметрів його функціонування (робочої потужності енергоблоків, пропускної здатності окремих елементів електричних мереж та їх груп тощо).

Для збереження надійного функціонування ОЕС України законодавчими та нормативно-правовими підставами для застосування заходів з примусового обмеження споживачів електричної енергії слід вважати на:

- законодавчому рівні - відповідні Закони України [3-5];

- нормативно-правовому рівні - постановами Кабінету Міністрів України [6], накази Мінпаливенерго (Міненерговугілля) України [7-12].

Еволюція питань запровадження примусових (умовно примусових) обмежень споживання електричної енергії в Україні може бути представлена наступними етапами в Таблиці 1.

Таблиця 1 – Еволюція питань запровадження примусових (умовно примусових) обмежень споживання електричної енергії

Етап	Характеристика етапу
1) 1995 – 2013 рр.	Запровадження ринкових відносин в енергетичній галузі в умовах дефіциту паливно-енергетичних ресурсів, заборгованості споживачів та зниження електроспоживання
2) 2014 – 2017 рр.	Перехідний етап від моделі ринку «закупівельного агентства» до ринку «оптової конкуренції» відповідно до Закону України «Про засади функціонування ринку електричної енергії України» в умовах дії Закону України «Про електроенергетику»
3) 2017 – 2019 рр.	Перехідний етап від моделі ринку «закупівельного агентства» до ринку «оптової конкуренції» відповідно до Закону України «Про ринок електричної енергії» в умовах дії існуючих нормативно-правових актів, розроблених на виконання вимог Закону України «Про електроенергетику»
4) з 2019 р.	Запровадження ринку «оптової конкуренції» відповідно вимог Закону України «Про ринок електричної енергії»

На першому та другому етапах еволюції (таблиця 1) були сформовані правові моделі організації запровадження примусових (умовно примусових) обмежень споживання електричної енергії. Принциповим питанням залишається можливість їх застосування, по-перше, на третьому етапі еволюції, по друге – в умовах запровадження ринку «оптової конкуренції» відповідно вимог Закону України «Про ринок електричної енергії».

Модель першого етапу базувалась на вимогах статей 5 «Державна політика в електроенергетиці» і 14 «Управління та розвиток об'єднаної енергетичної системи України» Закону України «Про електроенергетику», зокрема в частині збереження цілісності та забезпечення надійного і ефективного функціонування ОЕС України, та єдиного централізованого диспетчерського (оперативно-технологічного) управління. Основою заходів, спрямованих на запобігання аварійним ситуаціям або надзвичайним ситуаціям в ОЕС України, ліквідацію їх наслідків шляхом підтримки необхідного балансу потужності та енергії, застосування допоміжних заходів із забезпечення сталого функціонування ОЕС України та її паралельної роботи з енергетичними системами інших держав, є відповідні графіки обмеження споживачів електричної енергії.

Інструкція про складання і застосування графіків обмеження та аварійного відключення споживачів, а також протиаварійних систем зниження електроспоживання [10] визначає основні вимоги та критерії щодо запровадження графіків обмеження споживання електричної енергії, представлені в таблиці 2.

Слід зазначити, що значна частина критеріїв запровадження обмежень, зазначених у таблиці 2, має відносний характер і пов'язана з поточною ситуацією в ОЕС України, а рішення щодо необхідності їх застосування приймається відповідними посадовими особами.

Відповідно до вимог нормативних документів будь-який з визначених вище графік це – перелік споживачів електричної енергії з обов'язковим зазначенням назв ліній (фідерів).

Таблиця 2 – Аналіз критеріїв запровадження графіків обмеження та аварійного відключення споживачів

Умови використання	Критерії запровадження
1) Графіки обмеження споживання електричної енергії (ГОЕ)	
Виникнення дефіциту палива (зниження експлуатаційних запасів палива на електростанціях) або гідроресурсів	Обсяг експлуатаційних запасів палива менше необхідної для десяти діб роботи
2) Графіки обмеження споживання електричної потужності (ГОП)	
Виникнення загрози порушення балансу між виробництвом і споживанням електричної потужності та її дефіциту в ОЕС України або в її окремих частинах.	Дефіцит генеруючої потужності (<i>без визначення величини</i>), у тому числі в періоди добового максимуму навантаження (ранок/вечір)
3) Графіки аварійного відключення споживачів електричної енергії (ГАВ)	
Несподіваного виникнення аварійного дефіциту потужності та зниження частоти електричного струму у режимі відокремленої роботи ОЕС України з енергооб'єднанням країн СНД та Балтії.	Несподіване виникнення аварійного дефіциту генеруючої потужності (<i>без визначення величини</i>) Відсутність часу для введення ГОП або введені обмеження є недостатньо ефективними (<i>без визначення величини</i>) Зниження частоти електричного струму нижче рівня 49,6 Гц
Порушення узгодженого графіка перетоків електроенергії з енергооб'єднанням країн СНД та Балтії у режимі паралельної роботи ОЕС України (або її окремої частини) та енергооб'єднання країн СНД і Балтії	Факт порушення
Порушення режимів граничних перетоків або недопустимого перевантаження устаткування, зниження рівня напруги в контрольних точках.	Факт порушення
Необхідність запобігання порушенням граничнодопустимих режимів роботи гідроелектростанцій та водосховищ України.	Перевантаження устаткування, зниження рівня напруги в контрольних точках (<i>без визначення величини</i>)
Порушення узгодженого графіка перетоків до країн - учасників The Union for Coordination of Transmission Electricity (далі - УСТЕ), в режимі паралельної роботи "острова Бурштинської ТЕС" та УСТЕ у разі виникнення аварійного дефіциту потужності (застосовуються для споживачів, підключених до електромереж "острова Бурштинської ТЕС").	Факт порушення
У разі якщо не вистачає часу для введення ГОП або введені обмеження є недостатньо ефективними.	Неможливість покриття добового максимуму (ранок/вечір)
4) Спеціальні графіки аварійних відключень (СГАВ)	
Необхідність запобігання системним аваріям, пов'язаним із загрозою відокремлення ОЕС України від енергооб'єднання країн СНД та Балтії.	Порушення узгодженого графіка перетоків електроенергії з енергетичними системами інших держав (<i>без визначення величини</i>)
Порушення узгодженого графіка перетоків з енергооб'єднанням країн СНД та Балтії у режимі паралельної роботи ОЕС України (або її окремої частини) та енергооб'єднання країн СНД і Балтії.	Факт порушення
Подальшого зниження частоти електричного струму у режимі відокремленої роботи ОЕС України з енергооб'єднанням країн СНД та Балтії.	Зниження частоти електричного струму нижче рівня 49,4 Гц
Загрози розділення ОЕС України по одному із внутрішніх перерізів електромережі.	Порушення оперативно-технологічного управління перетоку електроенергії з підрозділами ОСП або ОСР (<i>без визначення величини</i>)

Продовження табл. 1

Порушення узгодженого графіка перетоків з УСТЕ в межах "острова Бурштинської ТЕС" (застосовуються для споживачів, підключених до електромереж "острова Бурштинської ТЕС").	Факт порушення
--	----------------

Які підлягатимуть відключенню в разі застосування графіків та (або) протиаварійних систем зниження електроспоживання із визначенням обсягів можливого обмеження електроспоживання. При цьому суттєві відмінності у формуванні графіків, визначених у таблиці 2, відсутні.

Загальна процедура формування та погодження графіків передбачає їх всебічний розгляд та опрацювання на різних рівнях: електропередавальні організації та споживачі електричної енергії; Держенергонагляд [13]; місцеві органи виконавчої влади; електроенергетичні системи ДП «НЕК Укренерго»; Міністерство енергетики та вугільної промисловості України.

Під час складання та погодження графіків з місцевими органами виконавчої влади для мінімізації збитків від їх застосування враховуються:

- суспільне значення споживачів;
- технологічні особливості споживача,
- схеми електропостачання;
- величини навантаження екологічної, аварійної та технологічної броні електропостачання.

Принциповим питанням в цієї моделі є визначення обсягів потужності (енергії) щодо яких можуть застосовуватись обмеження споживачів в ОЕС України, наведені у таблиці 3.

Таблиця 3 – Загальні умови формування графіків обмеження та аварійного відключення споживачів

Назва графіка	Обсяги складання графіків	Умови використання
ГОЕ	Не менше 30 % від добового споживання електричної енергії групи споживачів "Промисловість" (рядок 18 додатка 13 до [13])	Графік розподіляється на п'ять рівних черг. Величина обмеження споживання електричної енергії визначається у тис. кВт год. на добу
ГОП	Не менше 30 % від споживання електричної потужності в годину суміщеного максимуму ОЕС України групи споживачів "Промисловість"	Графік розподіляється на п'ять рівних черг. Величина обмеження споживання електричної потужності визначається у МВт.
ГАВ	Не менше 25 % від споживання електричної потужності в годину суміщеного максимуму навантаження ОЕС України	Графік розподіляються на десять черг. Кожна черга дорівнює 2,5 % ($\pm 0,1$ %) від загального обсягу ГАВ.
СГАВ	Від 40 % до 50 % від сумарного споживання потужності підприємств електроенергетики (брутто) зони електроенергетичної системи в годину суміщеного максимуму навантаження ОЕС України	СГАВ розподіляється на три рівномірні черги.

Обсяги для розроблення графіків у розрізі регіонів визначаються ДП «НЕК»Укренерго», затверджуються Міненерговугілля України і доводяться до підприємств електроенергетики не пізніше 1 червня.

Обсяги СГАВ визначаються ДП «НЕК»Укренерго» і доводяться до кожної електроенергетичної системи не пізніше 15 травня.

За результатами аналізу таблиці можна зробити висновок, що вихідна інформація для формування графіків обмеження та аварійного відключення споживачів ідентична. Відмінність лише в групах споживачів, що залучаються до участі у тому або іншому графіку.

На рисунку 1 наведено дані щодо розробки електропередавальними організаціями графіків обмеження за різні періоди.

Окремим питанням в частині забезпечення подолання аварійних ситуацій, які можуть виникати в енергосистемі є застосування системної протиаварійної автоматики, використання якої регламентується відповідними правилами. Правила застосування системної протиаварійної автоматики щодо запобігання та ліквідації небезпечного зниження або підвищення частоти в енергосистемах [9], визначають, що автоматичне частотне розвантаження (АЧР) розробляється, застосовується та переглядається для запобігання небезпечному зниженню частоти у разі виникнення дефіциту активної потужності в ОЕС України або в окремій частині шляхом вимкнення частини навантаження споживачів.

Правила [9], визначають, що спеціальна автоматика відключення навантаження розробляється та застосовується для:

- запобігання порушенню режиму роботи ОЕС України чи її окремих енергорайонів, забезпечення надійної та безпечної роботи об'єктів електроенергетики під час виробництва, передавання та постачання електричної енергії;
- збереження стійкості в контрольованих внутрішніх і міждержавних перетинах у разі їх роботи з недостатнім (нижче нормативного) запасом стійкості в доаварійних та/або після аварійних режимах вимкнення найбільш навантажених повітряних ліній електропередавання перетину або генерації в дефіцитній частині, яка пов'язана з основною частиною ОЕС України, повітряних ліній електропередавання контрольованого перетину;
- ліквідації (попередження) технологічних порушень у електроенергетичній системі в разі неприпустимого зниження частоти або напруги;
- ліквідації неприпустимого струмового перевантаження устаткування електричних мереж напругою 110 кВ і вище;
- запобігання виникненню "лавини напруги" в окремих вузлах навантаження для забезпечення надійного електропостачання найбільш відповідальних споживачів вузла в після аварійних режимах у разі вимкнення живильної повітряної лінії електропередавання;
- запобігання значним збиткам через тривалі обмеження електропостачання споживачів або перевитрати палива і гідроресурсів, які неминуче мали б місце під час роботи з нормативними запасами зі стійкості без впровадження САВН;
- запобігання значним збиткам через тривалі обмеження електропостачання споживачів у вузлі розподільчої мережі, які неминуче мали б місце без застосування САВН, з огляду на після аварійний режим із вимкненням зв'язку окремого вузла з енергосистемою.

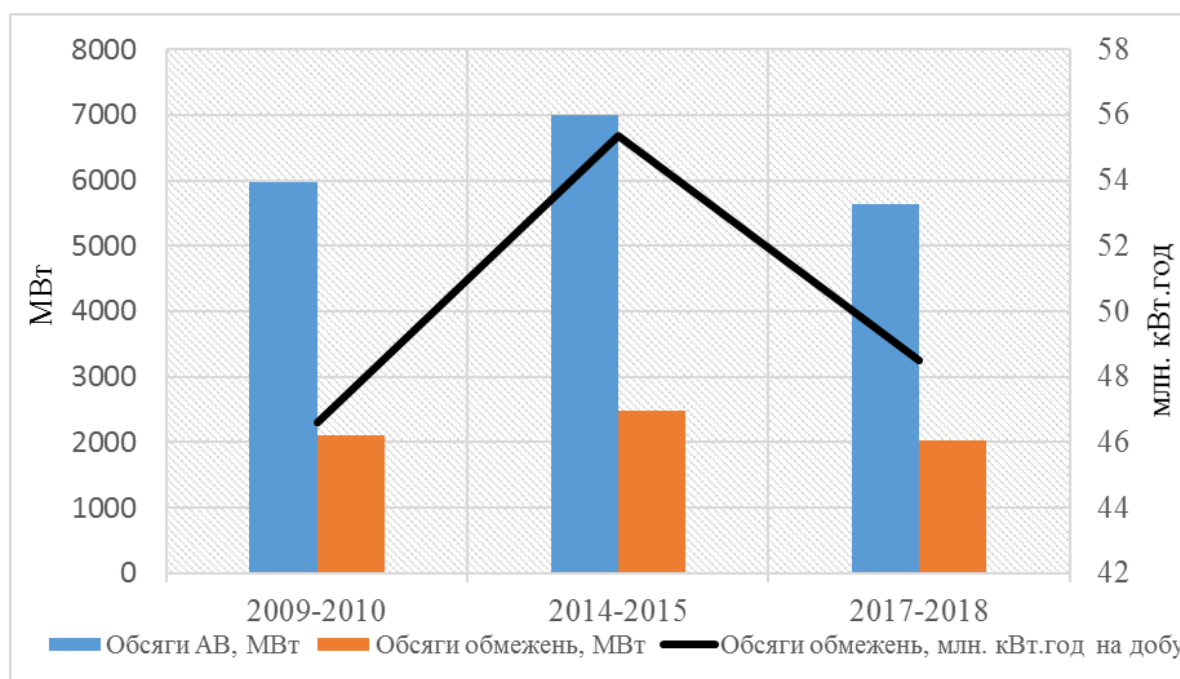


Рисунок 1 – Завдання для розробки електропередавальними організаціями: графіків обмеження споживання електричної енергії, графіків обмеження споживання потужності, графіків аварійного відключення

Якщо застосування ГАВ та СГАВ у повному обсязі не усунуло аварійну ситуацію в енергосистемі, споживачі відключаються САВН за допомогою кнопок (ключів).

Електроспоживання споживачів може бути обмежено до рівня аварійної броні електропостачання у разі застосування ГОЕ, ГОП, ГАВ. У разі застосування СГАВ, САВН або спрацювання пристроїв АЧР постачання електричної енергії споживачам може бути припинено повністю.

У разі виникнення дефіциту електроенергії Міненерговугілля України, ДП «НЕК»Укренерго», підприємства електроенергетики повинні інформувати місцеві органи виконавчої влади про ситуацію щодо постачання електроенергії. Про застосування комплексу заходів з обмеження і відключення

електроенергії підприємства електроенергетики повідомляють споживачів та населення через засоби масової інформації, у тому числі на офіційному веб-сайті.

Таким чином можна сказати, що модель першого етапу базувалася на створенні умов для зменшення негативного впливу можливих ризиків, що виникають в енергосистемі. При цьому, оцінка обсягів негативних наслідків носила експертний характер, а не базувалася на економічних розрахунках. Хоча і була створена система всебічного розгляду заходів на різних рівнях, прозорості і зрозумілості споживачем досягти було дуже складно.

Модель другого етапу передбачає використання можливостей моделі першого етапу та ґрунтується на виконанні вимог статті 29 «Порушення роботи ринку електричної енергії та надзвичайні заходи» Закону України «Про засади функціонування ринку електричної енергії України».

Визначальною є вимога, що у разі тривалого порушення нормальної роботи ринку електричної енергії внаслідок виникнення аварійних ситуацій в ОЕС України, викликаних пошкодженням електроенергетичних установок, їхніх елементів, споруд, або внаслідок **надзвичайних ситуацій** Кабінет Міністрів України має право приймати рішення щодо вжиття тимчасових надзвичайних заходів із подолання наслідків такої ситуації відповідно до затвердженого ним Порядку за поданням Міненерговугілля або НКРЕКП щодо виникнення порушення нормальної роботи ринку електричної енергії за результатами моніторингу ринку електричної енергії.

Водночас, слід зазначити, що відповідно до статті 17 «Системний оператор» Закону України «Про засади функціонування ринку електричної енергії України» системний оператор (ДП «НЕК «Укренерго») мав право проводити усі дії для запобігання аварійним ситуаціям або надзвичайним ситуаціям в об'єднаній енергетичній системі України і ліквідацію їх наслідків шляхом підтримки необхідного балансу потужності та енергії, застосування допоміжних заходів із забезпечення сталого функціонування об'єднаної енергетичної системи України та її паралельної роботи з енергетичними системами інших держав, передбачені статтею 14 Закону України «Про електроенергетику».

Додаткові можливості щодо подолання надзвичайних ситуацій визначені в Інструкції про складання і застосування графіків погодинного відключення електроенергії [14].

При цьому, ГПВ застосовуються з метою запобігання порушенням режиму роботи ОЕС України внаслідок дефіциту електричної потужності в період дії тимчасових надзвичайних заходів на ринку електричної енергії.

ГПВ складаються в обсязі не менше 75 % від максимального споживання електричної потужності в період з 8.00 до 22.00 години в режимний день замірів грудня попереднього року кожного підприємства електроенергетики (рядок 10 додатка 13 до [11]).

Графіки розподіляються на три рівні черги, які повинні підтримуватися в обсязі не менше 25 % від поточного електроспоживання.

Міністерство енергетики та вугільної промисловості України не пізніше ніж за 3 доби до початку застосування графіків повідомляє про ситуацію щодо постачання електроенергії та необхідність застосування ГПВ Київську міську та обласні державні адміністрації, державне підприємство і підприємства електроенергетики, які повідомляють місцеві органи виконавчої влади та споживачів через засоби масової інформації та свої веб-сайти.

ГПВ вводяться в дію розпорядженням директора (головного диспетчера) ДП «НЕК «Укренерго» за узгодженням з Міністерством енергетики та вугільної промисловості України.

Розпорядження про введення в дію ГПВ передається через структуру оперативного-диспетчерського управління ОЕС України (диспетчер державного підприємства, диспетчер електроенергетичної системи, диспетчер підприємства електроенергетики). У розпорядженні мають бути вказані термін та час початку і закінчення застосування ГПВ протягом доби.

Максимальна тривалість перерви в електропостачанні споживачів під час ГПВ не має перевищувати 2 годин 30 хвилин, а в умовах мінусових температур зовнішнього повітря (понад -10 С), коли перерва в електропостачанні може призвести до розладу систем централізованого теплопостачання, допускається перерва в електропостачанні до 1 години 30 хвилин.

Відключення електроенергії за ГПВ здійснюється по чергово та послідовно. Включення приєднань, відключених за ГПВ, виконується після відключення приєднань на відповідну величину навантаження наступної черги з метою недопущення збільшення споживання електричної потужності по підприємству електроенергетики.

Таким чином на другому етапі з'являється ще одна форма графіків обмеження та аварійного відключення споживачів, яка за своєю ідеологією повторює відповідні графіки, які розглядалися в межах першої моделі.

Модель третього етапу (знаходиться у стадії формування). Питання запровадження заходів з обмеження споживачів на роздрібному ринку електричної енергії згідно Закону України «Про ринок електричної енергії» відноситься до питань безпеки постачання електричної енергії, порушення яких призводить до виникнення надзвичайної ситуації. Відповідно до пункту 6 статті 16 «Безпека постачання

електроенергії» у разі якщо порушення безпеки постачання електричної енергії призвело до виникнення надзвичайної ситуації в ОЕС України, оператор системи передачі оголошує про виникнення надзвичайної ситуації в ОЕС України. Критерії настання надзвичайної ситуації в ОЕС України та порядок її оголошення визначаються у кодексі системи передачі.

Згідно Закону [3] надзвичайна ситуація в ОЕС України – це ситуація, за якої виникає загроза порушення режиму роботи ОЕС України або її окремих частин, зокрема, внаслідок дефіциту електричної енергії та/або потужності, зниження частоти нижче гранично допустимих меж, порушення режиму допустимих перетоків і перевантаження мережевих елементів, зниження напруги в контрольних точках енергосистеми до аварійного рівня.

У разі виникнення надзвичайної ситуації в ОЕС України електроенергетичні підприємства зобов'язані діяти відповідно до Кодексу системи передачі та виконувати оперативні команди і розпорядження оператора системи передачі. При цьому важливим є визначити критерій (критерії), за яким режим був класифікований як режим надзвичайної ситуації, час та місце її виникнення, а також частину ОЕС України, на яку поширюється дія режиму надзвичайної ситуації.

Протягом дії режиму надзвичайної ситуації в ОЕС України оператору системи передачі надаються повноваження із застосування надзвичайних заходів відповідно до Кодексу системи передачі, зокрема, протиаварійні заходи, які застосовуються на період дії режиму надзвичайного стану та режиму відновлення, заходи, які необхідно вживати Користувачам системи для мінімізації негативних наслідків, а також заходи безпеки для обслуговуючого персоналу об'єктів енергетики та населення.

При цьому передбачено Правилами ринку, які, в тому числі, визначають правила функціонування балансувального ринку та ринку допоміжних послуг; визначається, положення щодо функціонування ринку при виникненні надзвичайної ситуації в ОЕС України.

З метою забезпечення контролю щодо підготовки діяльності в умовах надзвичайних ситуацій, відповідно до статті 10 «Повноваження місцевих органів виконавчої влади та органів місцевого самоврядування у відносинах із суб'єктами електроенергетики» приймають участь у розробленні і реалізації системи заходів щодо роботи об'єктів електроенергетики у разі виникнення надзвичайної ситуації в ОЕС України;

Відповідно до проекту Кодексу системи розподілу ГОЕ, ГОП, ГАВ і СГАВ *складаються ОСР в терміни та в обсягах, що визначаються згідно Інструкції про складання і застосування графіків обмеження та аварійного відключення споживачів, яка розробляється ОСП* згідно з Кодексом системи передачі та є стандартом операційної безпеки.

Очевидним є той факт, що створена в Україні система заходів обмеження споживання електричної енергії у вигляді відповідних графіків потребує реформування, зокрема, у зв'язку із встановленням нових вимог до відносин між суб'єктами ринку електричної енергії.

Обґрунтуванням можливості проведення такого реформування може стати аналіз принципів формування усіх раніше згаданих графіків. Основною відмінністю цих графіків можна назвати лише обсяги, на які вони складаються, оскільки принципи їх побудови залишаються практично незмінними. Це перелік підприємств та організацій, до яких застосовується те або інше обмеження.

Що стосується причин, то можна стверджувати, що вони мають однакову природу – це порушення балансу між виробництвом і споживанням. Відмінністю є потенційні негативні наслідки, через які застосовується той або інший захід обмеження. Таким чином, саме наслідки повинні стати критеріями диференціації надзвичайних ситуацій, які відповідно до чинного законодавства може оголошувати оператор системи передачі. Наприклад, може бути застосовано декілька етапів незвичайних ситуацій, які будуть диференціюватися в залежності від наслідків.

Що стосується графіків, то доречним є спрощення системи графіків шляхом переходу на використання ГПВ або ГОП, як найбільш зрозумілих для споживача електричної енергії систем обмеження.

Щоб структурувати порядок застосування графіків обмеження та аварійного відключення споживачів слід використати ГПВ або ГОП з використанням моделі їх формування, представлені на рисунку 2. Використання їх можливе в регіональному розрізі в залежності від ситуації та на рівні ОЕС України в цілому. При цьому, кількість черг для кожної ситуації може складати певну нормовану величину, наприклад, 10 шт. для кожної черги. Правила та критерії щодо поетапності введення «надзвичайної ситуації» можуть бути сформовані в «Кодексі системи передачі», який формує НКРЕКП. При цьому, важливим з точки зору ринку встановити чітке розмежування між різновидами «надзвичайних ситуацій». Тобто, здійснити їх диференціацію в залежності від складності наслідків для енергосистеми та вірогідності ризиків їх виникнення.

Обсяги складання графіків (від споживання електричної потужності в годину суміщеного максимуму навантаження ОЕС України)	Номер (код) надзвичайної ситуації	Загальна характеристика порушення балансу виробництва та споживання на ринку електричної енергії
до 25 %	1	Обсяг експлуатаційних запасів палива менше необхідної для десяти діб роботи
до 50 %	2	Зниження частоти електричного струму нижче рівня 49,6 Гц
до 75 %	3	Стійкий дефіцит генеруючої потужності в ОЕС України, подолання якого неможливо ринковими заходами

Рисунок 2 – Модель запровадження графіків обмеження та аварійного відключення споживачів

Для недопущення використання неринкових заходів, а фактично графіки обмеження та аварійного відключення споживачів є неринковим підходом зменшення дефіциту потужності енергосистеми, Законом [3] передбачено, що учасники ринку повинні планувати і вживати заходів відповідно до Правил про безпеку постачання електричної енергії та нести відповідальність за безпеку постачання електричної енергії в межах сфери своєї діяльності.

Принциповою вимогою Закону [3] є необхідність забезпечення балансу між побажаннями споживачів та можливостями суб'єктів електроенергетики, зокрема в частині, забезпечення надійного постачання електричної енергії. Тому важливим є :

- 1) розробка системи показників для оцінки надійності електропостачання;
- 2) встановлення відповідальності суб'єктів електроенергетики та споживачів за зниження рівня надійності постачання електричної енергії;
- 3) встановлення відповідності плати за електричну енергію з нормованим рівнем надійності з її фактичним рівнем.

Перша вимога практично реалізована в Україні шляхом запровадження показників надійності електропостачання та показників комерційної якості надання послуг [14]. Водночас, вважати ці показники достатніми для оцінки ситуації на даному етапі не вважається доцільним через низький рівень автоматизації в мережах і неможливість перевірки отриманих даних.

Для виконання другої умови, яка нерозривно пов'язана з першою, необхідно законодавчо встановити чітку відповідальність енергокомпаній за зниження рівня надійності. Невиконання договірних або нормативних вимог до надійності електропостачання повинно спричинити значні штрафи. При цьому виникає досить складне завдання контролю рівня надійності, а саме проведення значної роботи з безперервного моніторингу рівнів надійності вузлів навантаження, забезпеченням надійного та безпечного постачання електричної енергії споживачам [15].

Водночас, все це має стати підґрунтям для формування системи тарифів на електричну енергію, критерієм диференціації тарифних ставок якої буде встановлено надійність електропостачання. Запровадження такої системи тарифів підвищить відповідальність енергетиків за використання графіків обмеження та аварійного відключення споживачів, а споживач стане активним учасником на ринку електричної енергії використовуючи свої можливості для мобільного управління електроспоживанням.

Висновки

1. Прийняття Закону України «Про ринок електричної енергії» відповідно до вимог Конституції України поставило питання щодо перегляду ряду нормативних документів з питань організації обмеження споживачів на роздрібному ринку електричної енергії.

2. Аналіз існуючої практики організації обмеження споживачів на роздрібному ринку електричної енергії довів необхідність узгодження принципів і інструментарію, що регулюють безпеку постачання електричної енергії: існуючих нормативних та нормативно-технічних документів; введення нових норм, що регламентують принципи запровадження обмежень, а також оцінки кількісних показників надійності в умовах функціонування нового ринку електроенергії.

3. Формування підходів щодо організації обмеження споживачів на роздрібному ринку електричної енергії повинно базуватися на принципах економічно вигідної взаємодії суб'єктів ринку електричної енергії через використання відповідних тарифних систем на електричну енергію, або допоміжних послуг щодо підвищення надійності роботи ОЕС України.

Список використаної літератури

1. Журахівський А.В., Кінаш Б.М., Пастух О.Р. Надійність електричних систем і мереж: Навчальний посібник. – Львів: Вид. Львівської політехніки, 2012. 280 с.
2. Обоскалов В.П. Надежность обеспечения баланса мощности электроэнергетических систем: Монография. – Екатеринбург: ГОУ ВПО Уральский государственный технический университет – УПИ, 2002, 210 с.

3. Закон України «Про ринок електричної енергії».
4. Закон України «Про електроенергетику».
5. Закон України «Про засади функціонування ринку електричної енергії України».
6. Порядок постачання електричної енергії споживачам, затверджений постановою Кабінету Міністрів України від 24.03.1999 № 441 «Про невідкладні заходи щодо стабілізації фінансового становища підприємств електроенергетичної галузі» .
7. Правила підключення електроустановок споживачів до спеціальної автоматики вимкнення навантаження (САВН), затверджені наказом Мінпаливенерго України від 29.07.2002 № 449, зареєстрованих в Мінюсті 15.08.2002 за № 667/6955 (у редакції наказу Міненерговугілля від 31.07.2012 № 554).
8. Методика проведення контрольних вимірів фактичної електричної потужності в споживачів у години максимуму навантаження ОЕС України, затверджена наказом Мінпаливенерго України від 19.05.2003 № 241, зареєстрованою в Міністерстві юстиції України 03.06.2003 за №426/7747).
9. Правила застосування системної протиаварійної автоматики запобігання та ліквідації небезпечного зниження або підвищення частоти в енергосистемах, затверджена наказ Мінпаливенерго (Міненерговугілля) України від 01.12.2003 № 714, зареєстрованими в Міністерстві юстиції України 18.12.2003 за №1177/8498 (у редакції наказу Міненерговугілля від 31.07.2012 № 553).
10. Інструкція про складання і застосування графіків обмеження та аварійного відключення споживачів, а також протиаварійних систем зниження електроспоживання, затверджена наказом Мінпаливенерго України від 23.11.2006 № 456, зареєстрована в Мінюсті 19.02.2007 за № 151/13418.
11. Порядок організації проведення вимірів електричного навантаження в режимний день, затверджений наказом Мінпаливенерго України від 15.01.2008 № 7 зареєстрований в Міністерстві юстиції України 06.02.2008 за №84/14775.
12. Інструкція про складання і застосування графіків погодинного відключення електроенергії, затверджена наказом Міненерговугілля України від 15.10.2015 № 654, зареєстрована в Міністерстві юстиції України 28.01.2016 за №153/28283.
13. Замулко А.І., Веремійчук Ю.А., Матвійчук М.В. Аналіз результатів перевірки суб'єктів господарювання наглядовими органами – основа для здійснення енергетичного аудиту. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2016. №4. С. 32-37. ISSN 1813-5420 (Print).
14. Форми звітності № 11-НКРЕКП (квартальна) «Звіт щодо показників надійності електропостачання» та № 12-НКРЕКП (квартальна) «Звіт щодо показників комерційної якості надання послуг» та інструкцій щодо їх заповнення, затверджені постановою Національної комісії регулювання енергетики та комунальних послуг від 23.03.2017 № 345.
15. Положення про Державну інспекцію енергетичного нагляду України, затверджене постановою Кабінету Міністрів України від 14.02. 2018 р. № 77 «Деякі питання Державної інспекції енергетичного нагляду України».

А.И. Замулко, канд.тех.наук, доц., ORCID 0000-0001-8018-6332

Ю.А. Веремійчук, канд.тех.наук, ст. преп., ORCID 0000-0003-0258-0478

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

ОРГАНИЗАЦИЯ ОГРАНИЧЕНИЕ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ НА РОЗНИЧНОМ РЫНКЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ: ПРАВОВЫЕ ВОПРОСЫ

В статье рассмотрены вопросы законодательного и нормативно-правового обеспечения относительно надежного функционирования ОЭС Украины в направлении применения мер по принудительному ограничению потребителей электрической энергии. Проанализирована эволюция вопросов внедрения принудительных ограничений потребления электрической энергии в период реализации моделей рыночных отношений в энергетической отрасли. Проведено исследование использования и критерии введения графиков ограничения и аварийного отключения потребителей. Предложена модель введения графиков ограничения и аварийного отключения потребителей в условиях функционирования современного рынка электроэнергии, использование которой возможно в региональном разрезе в зависимости от ситуации и на уровне ОЭС Украины в целом. Использование принципов введения графиков ограничения может стать основой для формирования системы тарифов на электрическую энергию, критериями дифференциации тарифных ставок которых будет надежность электроснабжения. Введение такой системы тарифов повысит ответственность энергетиков за использование графиков ограничения и аварийного отключения потребителей, а потребитель станет активным участником на рынке электрической энергии используя свои возможности для мобильного управления электропотреблением.

Ключевые слова: рынок электрической энергии, ограничение потребление электрической энергии, графики ограничения, надежность электроснабжения.

A. Zamulko, Cand. Sc., Assoc. Prof., ORCID 0000-0001-8018-6332

Y. Veremiichuk, Cand. Sc., Assis. Prof., ORCID 0000-0003-0258-0478

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

**ORGANIZATION OF CONSUMER RESTRICTIONS ON RETAIL ELECTRICITY MARKET:
LEGAL ISSUES**

The article deals with the issues of legislative and regulatory support for the reliable UES of Ukraine functioning in the direction of the forced compulsory measures application for electric energy consumers. The article analyzes issues evolution for the compulsory restrictions introduction during implementation process of market models relations in the energy sector. The study of the conditions use and the criteria for introducing restriction and consumers emergency disconnection schedules was conducted. The implementation model of the restriction and emergency disconnection consumers schedules in the conditions of the modern electricity market functioning is proposed, the use of which is possible in the regional context, depending on the situation and at the level of the UES of Ukraine as a whole. The use of the principles of the introduction of the restrictions schedule can become the basis for the formation of a tariffs system for electric energy, the criteria for differentiation of tariff rates will be reliability of electricity supply. The introduction of such tariffs system will increase the responsibility of the power industry for using restriction schedules and emergency consumers disconnection and the consumer will become an active participant in the electricity market using its capabilities for mobile power consumption management.

Key words: electricity market, restriction of electric energy consumption, restriction schedule, reliability of power supply.

References

1. Zhurahovsky A.V., Kinash B.M., Pastukh O.R. Reliability of electrical systems and networks: Навчальний посібник. – Lviv: View. Lviv Polytechnic, 2012. 280 p. (Ukr)
2. Obskalov V.P. Reliability of providing power balance of electric power systems: Monograph. - Ekaterinburg: Ural State Technical University – 2002, 210 p. (Rus)
3. On electricy market: The Law of Ukraine
4. On electric power : The Law of Ukraine
5. On the principles of functioning of the electricity market of Ukraine: The Law of Ukraine.
6. The order of supply of electric energy to consumers, approved by the Cabinet of Ministers of Ukraine from 24.03.1999 № 441 "On urgent measures to stabilize the financial position of enterprises in the electric power industry".
7. Rules for connecting electrical installations to the special automation of shutdown load, approved by the Order of the Ministry of Fuel and Energy of Ukraine dated 29.07.2002 № 449.
8. Method of conducting control measurements of actual electric power in consumers at hours of maximum load of the united power system of Ukraine, approved by the Order of the Ministry of Fuel and Energy of Ukraine dated 19.05.2003 № 241.
9. Rules for the use of system anti-theft automation to prevent and eliminate dangerous lowering or increase of frequency in power systems, approved by the Ministry of Fuel and Energy of Ukraine from 01.12.2003 № 714.
10. Instruction on the drawing up and use of schedules for the restriction and emergency shutdown of consumers, as well as emergency systems for reducing electricity consumption, approved by the Order of the Ministry of Fuel and Energy of Ukraine dated 23.11.2006 № 456.
11. The order of the organization of conducting measurements of electric load in a duty day, approved by the order of the Ministry of Fuel and Energy of Ukraine dated 06.02.2008 №84/14775.
12. Instruction on the drawing up and use of hourly power cut-off graphs, approved by the Order of the Ministry of Energy and Coal of Ukraine dated 15.10.2015 № 654.
13. Zamulko A.I., Veremiichuk Y.A., Matviichuk M.V. The analysis of test results of the business entities by supervisory authorities – the basis for the energy audit. Power engineering economics, technique, ecology. 2016. №4. Pp 32-37. (Ukr) ISSN 1813-5420 (Print).
14. Forms of reporting No. 11-NKREKP "Report on indicators of electric power supply reliability" and No. 12-NKREKP "Report on indicators of commercial quality of service provision" and instructions for their completion, approved by the Resolution of the National Commission for Regulation of Energy and Utilities dated 23.03.2017 № 345.
15. Regulation on the State Inspectorate for Energy Supervision of Ukraine, approved by the Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine of 14.02. 2018 p. № 77

Надійшла 20.03.2018

Received 20.03.2018

ЕНЕРГЕТИКА СТАЛОГО РОЗВИТКУ SUSTAINABLE ENERGY

УДК 621.31

І.В. Притискач, канд. техн. наук, ст. викл., ORCID 0000-0002-1892-0054

В.О. Оникійчук, магістрант, ORCID 0000-0002-0709-9344

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

АНАЛІЗ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ІНТЕГРОВАНИХ СИСТЕМ КОМПЛЕКСНОГО ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СПОЖИВАЧІВ ІЗ УРАХУВАННЯМ ЕКОНОМІЧНИХ ТА ЕКОЛОГІЧНИХ ФАКТОРІВ

Представлено модель системи комплексного енергозабезпечення споживачів, у вигляді енергетичного хабу, який забезпечує потребу споживачів у електричній та тепловій енергії. Модель передбачає врахування трьох потоків енергії на вході: електрична енергія, природний газ та гаряча вода. До складу енергетичного хабу входять когенераційна установка та накопичувачі електричної та теплової енергії. Запропоновано мультикритеріальний підхід до оптимізації режимів роботи розглянутої системи енергозабезпечення. Результати моделювання із використанням даних про навантаження споживачів та параметри енергоустановок вказують на доцільність застосування запропонованого підходу для визначення оптимальних значень погодинного споживання енергоресурсів в розглянутій системі.

Ключові слова: інтегрована система енергопостачання, розосереджена генерація, мінімізація витрат, когенераційна технологія, енергетичний хаб.

Вступ. Для багатьох країн енергетична безпека є однією з найбільш важливих областей економічної безпеки. Глобальна енергетична криза у зв'язку зі скороченням світових запасів нафти і газу, постійне зростання цін на енергоресурси та негативний вплив від спалювання викопного палива на зміну клімату, призвели до підвищеної зацікавленості світової економіки у збільшенні виробництва та використання альтернативних і поновлюваних джерел енергії. Розвиток нетрадиційних та відновлюваних джерел енергії слід розглядати як важливий фактор підвищення енергетичної безпеки. Масштабне використання потенціалу таких джерел енергії в Україні є не тільки національним пріоритетом, але має також значне міжнародне значення як важливий фактор протидії глобальним змінам клімату, що покращує загальний стан енергетичної безпеки в Європі. Саме тому, підвищення рівня використання альтернативних (нетрадиційних та поновлюваних) джерел енергії та палива є одним з основних напрямків реалізації державної політики енергозбереження України.

З'являється потреба у забезпеченні ефективного функціонування нетрадиційних та відновлюваних джерел енергії та їх інтеграції до існуючих енергосистем. Концепція інтегрованої енергопостачальної системи полягає у поєднанні елементів енергетичної інфраструктури, зокрема пов'язаних із забезпеченням споживачів електроенергією та теплом, тим самим забезпечуючи обмін потужністю між раніше розділеними системами. Інтегрованої енергопостачальна система забезпечує функції отримання, постачання, перетворення та зберігання різних видів енергії. Концепція інтегрованої енергопостачальної системи використовує поняття «енергетичних хабів», які можна розглядати як узагальнення поняття мережеских вузлів в традиційних електричних мережах на більшу кількість видів енергоносіїв із врахуванням можливості їх взаємного перетворення. Розроблення та впровадження підходів до оптимізації функціонування таких енергетичних хабів є перспективним питанням у контексті сталого розвитку енергетики України, залучення нових інвестицій у нетрадиційні та відновлювані джерела енергії, стимулювання діяльності активного споживача, забезпечення нормативної якості електроенергії, реалізації концепції Smart Grid.

Проблемам дослідження інтегрованих енергопостачальних систем в цілому, і енергетичних хабів зокрема, присвячено численні дослідження вітчизняних і закордонних вчених. Основні засади концепції «енергетичного хабу» розглянуто в [1]. Впровадження таких комбінованих багатогенераційних систем може призвести до значного підвищення енергоефективності, зменшення викидів CO₂ та економії коштів у процесі забезпечення кінцевих споживачів енергоресурсами. У цьому напрямку наукове співтовариство розглядає аналіз та планування розподіленої генерації з широкомасштабними підходами з урахуванням технічних, екологічних, економічних та соціальних питань [2-3].

Як визначено в [4], енергетичний хаб є інтегрованою системою з кількома видами енергоносіїв, і яка поєднує технології виробництва, перетворення та зберігання енергії, зокрема нетрадиційні та відновлювані джерела енергії та накопичувачі енергії, для забезпечення кінцевих споживачів електроенергією, теплом, холодом та іншими видами енергоносіїв [5]. Значна кількість сучасних досліджень присвячена визначенню характеристик, плануванню, оцінюванню та оптимізації енергетичних хабів [6-8].

Проблема експлуатації енергетичних хабів полягає в тому, щоб забезпечити оптимальний вибір компонентів енергетичних хабів та забезпечити їх об'єднання в одну систему. Досліджуючи потоки різних енергоносіїв виконують аналіз взаємодії між джерелами генерації енергії та кінцевими споживачами [9]. Для визначення оптимальних рівнів витрат на придбання енергоносіїв важливою є задача оперативного планування роботи різних елементів енергетичного хабу, що вирішується на оперативному горизонті часу.

Мета та завдання. Метою дослідження є вивчення можливостей ефективного використання енергії в інтегрованих енергопостачальних системах, а також розробка та вдосконалення моделей мультикритеріального планування та оптимізації режимів роботи інтегрованих систем комплексного енергозабезпечення споживачів із урахуванням економічних та екологічних факторів. Для досягнення поставленої мети в роботі були сформульовані та вирішені наступні завдання: аналіз сучасного стану та технічного рівня обладнання і технологій комплексного енергозабезпечення споживачів в світі і Україні; аналіз проблеми експлуатації енергетичних хабів, які включають засоби розосередженої генерації та накопичувачі енергії; розробка моделі забезпечення оптимального режиму споживання та генерування різних видів енергоресурсів із застосуванням наявних джерел енергії.

Матеріал і результати досліджень. До складу енергетичного хабу, з точки зору функціональності, можуть входити три основних види елементів: прямі з'єднання, перетворювачі енергії та накопичувачі енергії.

Прямі з'єднання використовуються для доставки вхідного енергоносія до виходу без перетворення його в іншу форму енергії та без суттєвої зміни його параметрів (наприклад, електричної напруги, тиску газу тощо). Прикладами цього типу елементів можуть бути лінії електропередачі та трубопроводи.

Перетворювачі енергії використовуються для перетворення енергії в інші форми або для зміни параметрів енергоносія. Прикладами є парові і газові турбіни, електричні машини, паливні елементи, електролізери, термоелектричні перетворювачі тощо. Компресори, насоси, трансформатори, силові електронні інвертори також відносяться до перетворювачів енергії. Третій тип елемента використовується для зберігання енергії. До цього виду елементів відносяться, наприклад, електричні акумулятори.

Одним із основних елементів енергетичного хабу є об'єкти розосередженої генерації. В багатьох країнах світу в даний час, поряд із розвитком централізованого енергопостачання, все більш активно підтримується тенденція широкомасштабного переходу до розосередженої генерації.

Існують різні підходи до визначення поняття розосередженої генерації енергії. У ряді випадків термін «розосереджена генерація енергії» використовується як синонім поняття генерації в децентралізованій енергосистемі для покриття потреб в енергії ізольованих (не підключених до магістральних мереж) споживачів.

Розосереджена генерація – це практика розміщення невеликих енергогенеруючих потужностей, близьких до точки кінцевого споживання.

Розподілена генерація має багато переваг, зокрема:

- скорочення витрат на електроенергію;
- підвищення надійності електропостачання;
- забезпечення можливості продажу електроенергії;
- генерування екологічно чистої енергії.

Розосереджена генерація є хорошим рішенням для багатьох цілей, оскільки елементи малої генерації є легко доступними, прості в установці та експлуатації, можуть бути переміщені оскільки є модульними, і економічно ефективні.

Представимо модель функціонування інтегрованої системи комплексного енергозабезпечення, яка має на меті задовольнити потребу споживачів у електричній та тепловій енергії із максимальною ефективністю. Така система буде розглядатись як енергетичний хаб, який працює паралельно із існуючими централізованими системами електропостачання та теплопостачання. Основними енергоносіями, які споживаються в енергетичному хабі є електроенергія та тепло для житлових та громадських будівель, а також промислових об'єктів невеликої потужності. Електроенергія використовується для роботи систем освітлення, вентиляції побутових потреб, роботи технологічного обладнання. Тепло споживається у вигляді гарячої води. Для отримання цих енергоносіїв використовуються такі джерела: електроенергія може купуватися в енергосистемі та генеруватися на когенераційній установці; тепло одержується із централізованої системи та одержується на когенераційній установці. Споживачі енергетичного хабу сплачують за електроенергію за двозонним тарифом. Когенераційна установка працює на природному газі.

Функціональна схема енергетичного хабу представлена на рис. 1.

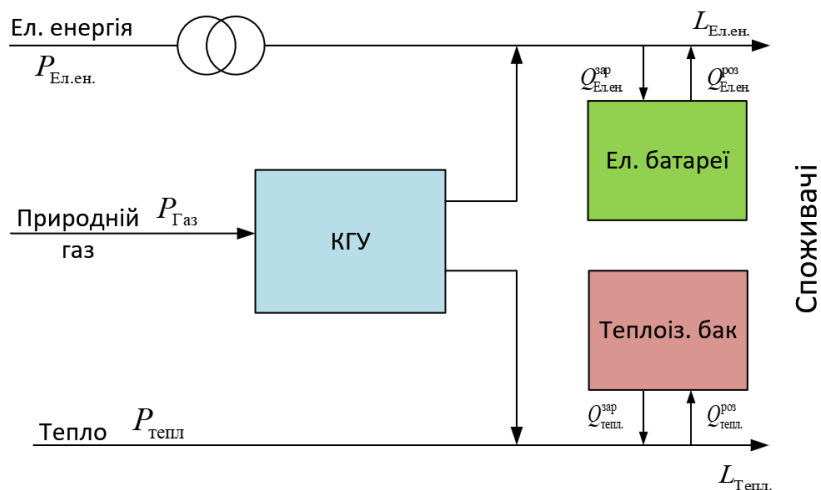


Рисунок 1 – Функціональна схема енергетичного хабу

Ціллю системи комплексного енергозабезпечення є такий режим її функціонування, коли в повному обсязі забезпечуються потреби споживачів в енергоносіях при максимально ефективних фінансових показниках роботи, тобто мінімальних витратах на купівлю електроенергії, природного газу та тепла у енергопостачальних організаціях.

Згідно підходу, запропонованого у роботі [2], сформулюємо цільову функцію та обмеження оптимізаційної моделі. Цільова функція буде мати такий вигляд:

$$\sum_{k=0}^{T-1} (c_{\text{Ел.ен.}}(k)P_{\text{Ел.ен.}}(k) + c_{\text{Тепл.}}(k)P_{\text{Тепл.}}(k) + c_{\text{Газ.}}(k)P_{\text{Газ.}}(k)) \rightarrow \min \quad (1)$$

де $c_{\text{Ел.ен.}}(k)$, $c_{\text{Тепл.}}(k)$, $c_{\text{Газ.}}(k)$ – тарифи на електроенергію, тепло та газ на ринку за k -ий інтервал часу (годину), грн/кВт·год;

$P_{\text{Ел.ен.}}(k)$, $P_{\text{Тепл.}}(k)$, $P_{\text{Газ.}}(k)$ – обсяг покупки електроенергії, тепла та газу на ринку за k -ий інтервал часу (годину), кВт·год.

Крім економічного критерію, при визначенні оптимальних режимів функціонування енергетичного хабу, до уваги може бути взято екологічний критерій. У цьому випадку цільовою функцією може виступати мінімізація викидів CO₂ при виробництві та транспортуванні енергії. Для нашого випадку, викиди при генеруванні електроенергії можуть бути розраховані із врахуванням національного значення коефіцієнта викидів CO₂ для електроенергії згідно з частиною II [10], розробленому у 2013-2014 роках Об'єднаним Дослідницьким Центром Енергетики і Транспорту (Європейська Комісія), яке для України становить 0,924 кг/кВт·год. Аналогічним чином може бути визначений коефіцієнт для централізованого теплопостачання. Для випадку спалювання газу в когенераційній установці було прийнято середнє значення для такого типу обладнання.

Цільова функція для критерію мінімізації викидів CO₂ буде мати такий вигляд:

$$\alpha_{\text{Ел.ен.}} \sum_{k=0}^{T-1} P_{\text{Ел.ен.}}(k) + \alpha_{\text{Тепл.}} \sum_{k=0}^{T-1} P_{\text{Тепл.}}(k) + \alpha_{\text{Газ.}} \sum_{k=0}^{T-1} P_{\text{Газ.}}(k) \rightarrow \min \quad (2)$$

де $\alpha_{\text{Ел.ен.}}$, $\alpha_{\text{Тепл.}}$, $\alpha_{\text{Газ.}}$ – питомі викиди на генерацію електроенергії та тепла в централізованих системах енергопостачання, а також викиди при спалюванні газу в когенераційній установці, кг/кВт·год.

Баланс надходження та споживання енергоресурсів задаємо у вигляді обмежень. Перетворення різних видів енергоресурсів представимо за допомогою матриці перетворення Θ . Також у рівняннях балансу враховано можливість накопичувати енергію (в електричних акумуляторах та теплоізолюваних баках із гарячою водою). Із врахуванням підходів запропонованих у [2], обмеження мають вигляд:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{E}(k+1) &= \mathbf{E}(k) + \mathbf{A}^{зар} \mathbf{Q}^{зар}(k) - \mathbf{A}^{роз} \mathbf{Q}^{роз}(k) - \mathbf{E}_L, \\
 \mathbf{L}(k) &= \mathbf{\Theta} \mathbf{P}(k) - \mathbf{Q}^{зар}(k) + \mathbf{Q}^{роз}(k), \\
 \mathbf{P}(k)^{\min} &\leq \mathbf{P}(k) \leq \mathbf{P}(k)^{\max}, \\
 0 \leq Q_i^{зар}(k) &\leq \delta_i^{зар}(k) Q_i^{\max}(k) \quad i=1, \dots, M, \\
 0 \leq Q_i^{роз}(k) &\leq \delta_i^{роз}(k) Q_i^{\max}(k) \quad i=1, \dots, M, \\
 \delta_i^{зар}(k) + \delta_i^{роз}(k) &\leq 1 \quad i=1, \dots, M, \\
 \mathbf{E}(k)^{\min} &\leq \mathbf{E}(k) \leq \mathbf{E}(k)^{\max}, \\
 \mathbf{E}_0 &= \mathbf{E}_T
 \end{aligned} \tag{3}$$

\mathbf{P} – вектор-стовпець, що представляє вхідні енергетичні потоки (рівні споживання кожного енергоресурсу);

\mathbf{L} – вектор-стовпець, що представляє вихідні енергетичні потоки (споживання);

$\mathbf{\Theta}$ – матриця перетворення типів енергії (містить 0 при неможливості перетворення або значення коефіцієнтів перетворення);

$\mathbf{P}^{\min}, \mathbf{P}^{\max}$ – вектори-стовпці, що представляють обмеження на мінімальні та максимальні рівні енергетичних потоків, визначається номінальною потужністю та навантажувальною здатністю елементів;

$\mathbf{Q}^{зар}, \mathbf{Q}^{роз}$ – вектори-стовпці, що представляють обмін енергією з пристроями накопичення енергії;

$\mathbf{A}^{зар}, \mathbf{A}^{роз}$ – діагональні матриці ККД накопичувачів різних видів енергії;

\mathbf{E} – вектор, що містить рівень накопиченої енергії в накопичувачах;

\mathbf{E}_L – вектор, що містить значення втрат енергії в накопичувачах за одиницю часу;

\mathbf{E}_0 – вектор, що містить рівень накопиченої енергії в накопичувачах в початковий момент часу для $k=0$;

Q_i^{\max} – ємність накопичувачів енергії;

$\delta_i^{зар}, \delta_i^{роз}$ – додаткові бінарні змінні, які введені для реалізації обмеження на неможливість одночасного накопичення і використання енергії з накопичувачів (неможливості заряду і розряду в одну одиницю часу).

Матриці, що входять в рівняння обмежень представимо таким чином

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} P_{Ел.ен.} \\ P_{Газ} \\ P_{Тепл.} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{L} = \begin{bmatrix} L_{Ел.ен.} \\ L_{Тепл.} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{Q}^{зар} = \begin{bmatrix} Q_{Ел.ен.}^{зар} \\ Q_{Тепл.}^{зар} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{Q}^{роз} = \begin{bmatrix} Q_{Ел.ен.}^{роз} \\ Q_{Тепл.}^{роз} \end{bmatrix} \tag{4}$$

$$\mathbf{A}^{зар} = \begin{bmatrix} \eta_{Ел.ен.}^{зар} & 0 \\ 0 & \eta_{тепл.}^{зар} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{A}^{роз} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\eta_{Ел.ен.}^{зар}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\eta_{тепл.}^{зар}} \end{bmatrix} \tag{5}$$

$$\mathbf{\Theta} = \begin{bmatrix} \varpi_{Ел.транс.} & \varpi_{КГУ}^{Ел.ен.} & 0 \\ 0 & \varpi_{КГУ}^{Тепл.} & \varpi_{ЦО} \end{bmatrix} \tag{6}$$

Крім однокритеріальних цільових функцій розглянемо мультикритеріальний підхід до визначення оптимальних режимів функціонування енергетичного хабу. Задачу представимо у вигляді

$$\begin{aligned}
 y &\rightarrow \min, \\
 F_1(\mathbf{P}) - w_1 y &\leq F_1^* \\
 F_2(\mathbf{P}) - w_2 y &\leq F_2^*
 \end{aligned} \tag{7}$$

$$F_1(\mathbf{P}) = \sum_{k=0}^{T-1} (c_{\text{Ел.ен.}}(k)P_{\text{Ел.ен.}}(k) + c_{\text{Тепл.}}(k)P_{\text{Тепл.}}(k) + c_{\text{Газ.}}(k)P_{\text{Газ.}}(k))$$

де $F_1(\mathbf{P})$ – цільова функція за економічним критерієм,

$$F_2(\mathbf{P}) = \alpha_{\text{Ел.ен.}} \sum_{k=0}^{T-1} P_{\text{Ел.ен.}}(k) + \alpha_{\text{Тепл.}} \sum_{k=0}^{T-1} P_{\text{Тепл.}}(k) + \alpha_{\text{Газ.}} \sum_{k=0}^{T-1} P_{\text{Газ.}}(k)$$

де $F_2(\mathbf{P})$ – цільова функція за екологічним критерієм,

W_1, W_2 – вагові коефіцієнти, які виражають міру відносних компромісів між цілями,

F_1^*, F_2^* – значення, до яких ми прагнемо наближати результат цільових функцій.

Виконаємо чисельне моделювання розглянутого енергетичного хабу для оцінки особливостей результатів та адекватності моделі. Моделювання виконаємо для тривалості 24 години із дискретизацією 1 година. Такий сценарій можна розглядати типовим, оскільки в процесі функціонування енергетичного хабу можна накопичити досить представницьку статистику про особливості добових графіків навантаження споживачів підприємства та досить точно прогнозувати потребу в енергоресурсах на наступну добу.

Для моделювання були використані типові графіки споживання електроенергії та тепла в системі гарячого водопостачання для змішаного побутового та промислового навантаження.

Значення коефіцієнтів перетворення енергії та максимальні значення потужності енергоустановок представлені в таблиці 1.

Смність електричних акумуляторних батарей прийнята рівною 500 кВт·год, а обсяг теплової енергії, який можна запасати у теплоізолюваному баку із гарячою водою, становить 1000 кВт·год.

Таблиця 1 – Значення параметрів, використані у розрахунку

Значення коефіцієнтів у матриці перетворення енергії			
	Енергосистема	КГУ	Система гарячого водопостачання
Електрична енергія	0.94	0.3	0
Тепло	0	0.4	0.9
Максимальні значення потужностей енергоустановок			
Трансформатор, кВА	КГУ, кВт	З'єднання з системою гарячого водопостачання, кВт	
630	350	1000	

Безпосередньо моделювання оптимізаційних задач виконувалося із використанням пакету Optimization Toolbox середовища MATLAB.

Результати розрахунків представлені на рисунках 2–6. Варіант а відповідає використанню економічного критерію, б екологічного критерію, в – мультикритеріальний підхід. На рисунках 7-8 додатні значення відповідають накопиченню енергії, а від'ємні – споживанню енергії із акумуляторів.

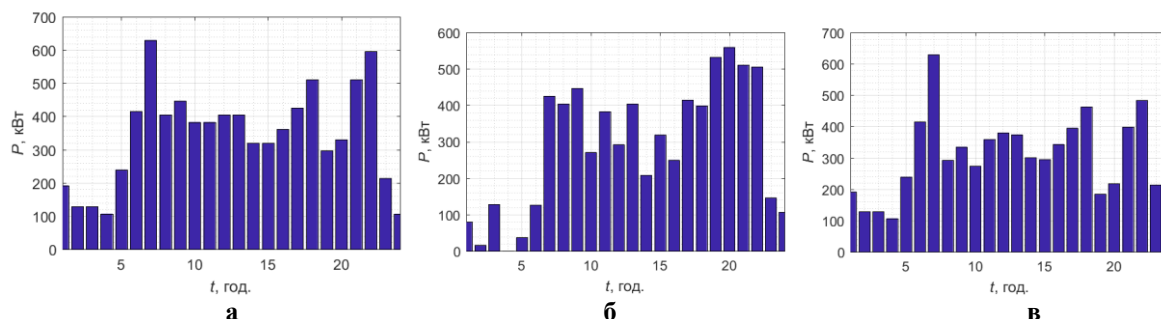


Рисунок 2 – Споживання електроенергії із енергосистеми

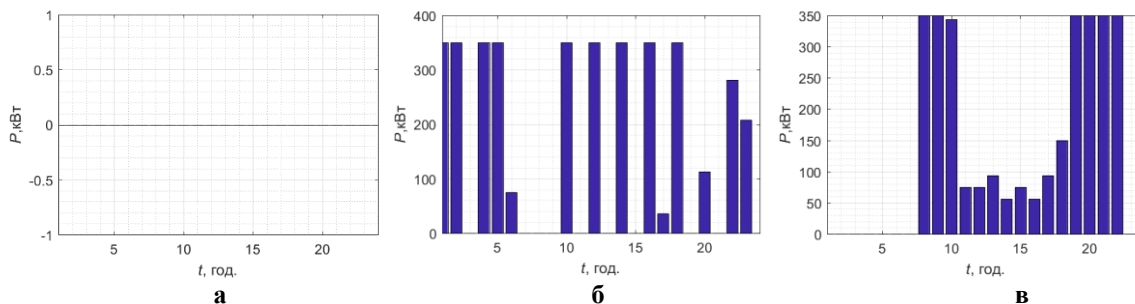


Рисунок 3 – Продуктивність КГУ

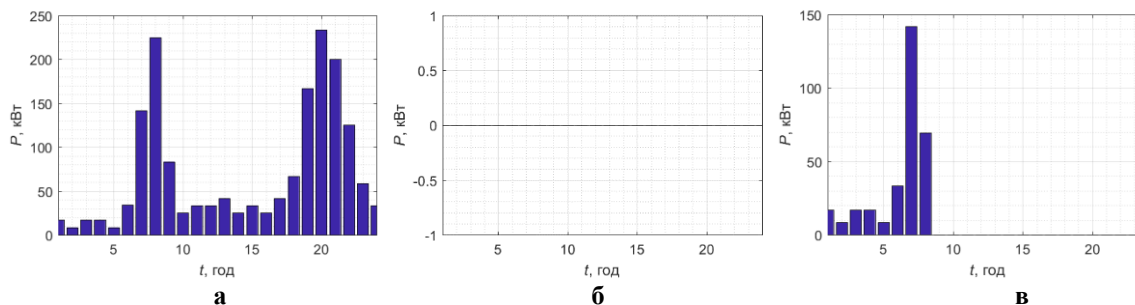


Рисунок 4 – Споживання потужності із системи гарячого водопостачання

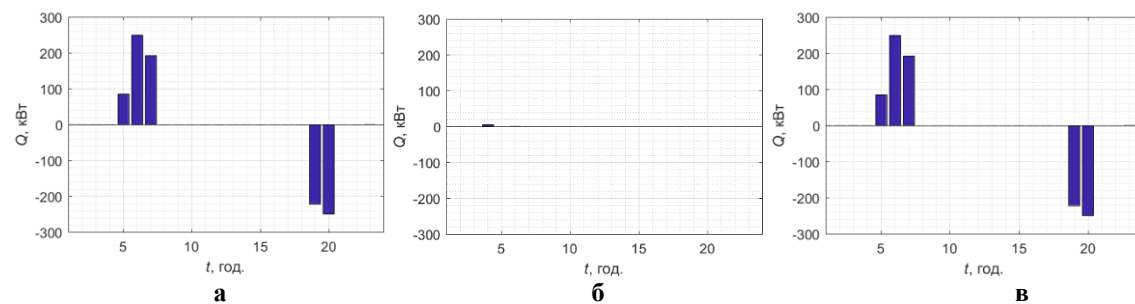


Рисунок 5 – Обмін енергією із електричними акумуляторами

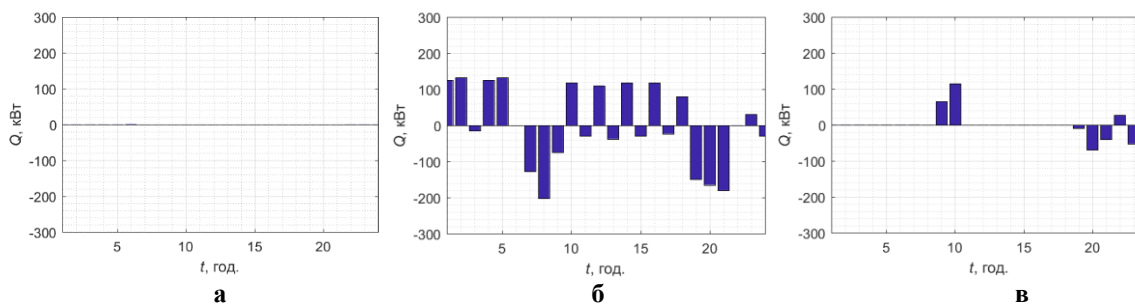


Рисунок 6 – Обмін енергією із накопичувачем гарячої води

Як видно із графіків, для різних критеріїв спостерігається дещо різний профіль споживання електроенергії із мережі. Також видно, що для першого критерію робота когенераційної установки виявилася неефективною протягом всієї доби. Режими роботи накопичувачів електричної та теплової енергії також виявився різним. Видно, що для варіанту застосування економічного критерію та мультикритеріальної оптимізації відбувається активне накопичення електроенергії в години доби із низьким тарифом і споживання в години максимальних навантажень. Для сценарію тільки екологічного критерію застосування акумуляторів електроенергії взагалі виявилася непотрібною. Це ж стосується застосування накопичувачів гарячої води для варіанту використання економічного критерію.

Значення цільових функцій, які одержані для різних варіантів, представлено у таблиці 3.

Таблиця 3 – Значення коефіцієнтів у матриці перетворення енергії

	Економічний критерій	Екологічний критерій	Мультикритеріальна оптимізація
Витрати коштів, грн/доба	14024	14960	14095
Викиди CO ₂ , кг/доба	8097	7216	7422

Як видно з таблиці 3, при використанні економічного критерію викиди CO₂ значно більші від мінімально досяжного значення. Аналогічно, для екологічного критерію витрати коштів на 6,5% більші за оптимальні. В той же час спільне використання двох критеріїв дає змогу досягти ефективного компромісу, за якого витрати всього на 0,5% більші за оптимальні, при викидах CO₂ близьких до мінімальних.

Висновки.

Запропоновано мультикритеріальний підхід до планування та оптимізації режимів роботи систем комплексного енергозабезпечення споживачів із джерелами розосередженої генерації та накопичувачами енергії, який дає змогу підвищити ефективність функціонування таких систем. За результатами моделювання на прикладі енергетичного хабу із трьома видами енергоносіїв показано, що даний метод підходить для планування погодинного споживання електричної енергії, природного газу та гарячої води, при компромісі з точки зору мінімальних витратах на дані енергоресурси та викиди CO₂.

Список використаної літератури

1. Energy hubs for the future / Geidl M., Koeppel G., Favre-Perrod P., Klockl B.. // IEEE Power and Energy Magazine. – 2007. – №1. – С. 24–30.
2. Parisio A. A robust optimization approach to energy hub management / Parisio A., Del Vecchio C., Vaccaro A.. // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2012. – №42. – С. 98–104.
3. Chicco, G. Distributed multigeneration: A comprehensive view / Chicco, G., Mancarella P.. // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2009. – №3. – С. 535–551.
4. Geidl M. Integrated modeling and optimization of multi-carrier energy systems / Geidl M.. // ETH Zurich: Power Systems Laboratory. – 2007.
5. Brahman F. Optimal electrical and thermal energy management of a residential energy hub, integrating demand response and energy storage system / Brahman F., Honarmand M., Jadid S. // Energy and Buildings. – 2015. – №90.
6. Anders, G. Innovations in power systems reliability / Anders, G., Vaccaro A.. // Springer Series in Reliability Engineering. – 2011. – №1. – С. 361–375.
7. Krause T. Multiple-Energy Carriers: Modeling of Production, Delivery, and Consumption / Krause T., G. Andersson K. Fröhlich A. Vaccaro. // Proceedings of the IEEE. – 2007. – №1. – С. 15–27.
8. Analysis of the results of optimal energy consumption planning for residential complex energy hub / Ю.Веремійчук, І. Притискач, О. Ярмолюк та ін.]. // IEEE 58th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON). – 2017. – №10. – С. 12–13.
9. Energy hub function optimization models during ukrainian energy resources market liberalization / Ю.Веремійчук, І. Притискач, О. Ярмолюк, В. Опришко. // Scientific Journal of Riga Technical University, Power and Electrical Engineering. – 2017. – №34. – С. 14–17.
10. Gabrielaitiene I. Как разработать «План действий по устойчивому энергетическому развитию (ПДУЭР) в городах восточного партнерства и центральной Азии» / Gabrielaitiene I., Melica G., Bertoldi P.. // JRS sciece and policy report JRC 90401. – 2014. – №10.

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

V. Onikiychuk, Msc. **ORCID** 0000-0002-0709-9344

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

ANALYSIS AND OPTIMIZATION OF COMPLEX ENERGY SUPPLY INTEGRATED SYSTEMS WITH CONSIDERATION OF ECONOMIC AND ENVIRONMENTAL FACTORS

The model of complex energy supply system of consumers is presented, in the form of an energy hub, which ensures the need of consumers in electric and thermal energy. The model includes taking into account three streams of energy at the input: electric energy, natural gas and hot water. The ergy hub includes a cogeneration

unit, storage units for electric and thermal energy. Multi-criteria approach for optimizing the operating modes of the considered energy supply system is proposed. Simulation results using data on load of consumers and parameters of power plants indicate the expediency of the proposed approach to determine the optimal values of hourly energy consumption in the considered system.

Keywords: integrated power distribution systems, distributed generation, active consumer, cogeneration technology, energy hub.

References

- [1] Geidl, M., "Energy hubs for the future", in IEEE Power and Energy Magazine, Geidl, M., , G. Koeppel, Favre-Perrod P., Klockl B., G. Andersson, and K. Frohlich, 2007, pp. 24-30.
- [2] Parisio, A., "A robust optimization approach to energy hub management", in International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Parisio, A. , C. Del Vecchio, and A. Vaccaro, 2012, pp. 98-104.
- [3] Chicco, G., "Distributed multigeneration: A comprehensive view", in Renewable and Sustainable Energy Reviews, Chicco, G. and P. Mancarella, 2009, pp. 535-551.
- [4] Geidl, M., "Integrated modeling and optimization of multi-carrier energy systems" in ETH Zurich: Power Systems Laboratory, 2007.
- [5] Brahma, F., "Optimal electrical and thermal energy management of a residential energy hub, integrating demand response and energy storage system", in Energy and Buildings, Brahma F., Honarmand M., Jadid S., 2015, pp. 65-75.
- [6] Anders, G., "Innovations in power systems reliability", in XVI: 361 of Springer series in reliability engineering, Anders, G., Vaccaro A., 2011.
- [7] Krause, T., "Multiple-Energy Carriers: Modeling of Production, Delivery, and Consumption", in Proceedings of the IEEE, Krause T., G. Andersson K. Fröhlich A. Vaccaro. , 2007, pp.15-27.
- [8] Veremiichuk Y., "Analysis of the results of optimal energy consumption planning for residential complex energy hub", in 2017 IEEE 58th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University, Y. Veremiichuk, I. Prytyskach, O. Yarmoliuk, V. Opryshko., 2017, pp. 12-13.
- [9] Y. Veremiichuk, "Energy hub function optimization models during ukrainian energy resources market liberalization" in Scientific Journal of Riga Technical University, Power and Electrical Engineering, Y. Veremiichuk, I. Prytyskach, O. Yarmoliuk, V. Opryshko, 2017, pp. 14-17.
- [10] Gabriellaitiene I. "How to develop the "Action Plan for Sustainable Energy Development (SEAP) in the cities of the Eastern Partnership and Central Asia", in JRS science and policy report JRC 90401, Gabriellaitiene I., Melica G., Bertoldi P., 2014.

И.В. Прытыскач, канд. техн. наук, ст. преп., **ORCID 0000-0002-1892-0054**

В. Оникійчук, магистрант **ORCID 0000-0002-0709-9344**

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

АНАЛИЗ И ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ИНТЕГРИРОВАННЫХ СИСТЕМ КОМПЛЕКСНОГО ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ С УЧЕТОМ ЭКОНОМИЧЕСКИХ И ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ

Представлена модель системы комплексного энергообеспечения потребителей, в виде энергетического хаба, который обеспечивает потребителей электрической и тепловой энергией. Модель предполагает учет трех потоков энергии на входе: электрическая энергия, природный газ и горячая вода. В состав энергетического хаба входят когенерационная установка и накопители электрической и тепловой энергии. Предложен мультикритериальный подход к оптимизации режимов работы рассматриваемой системы энергообеспечения. Результаты моделирования с использованием данных о нагрузке потребителей и параметры энергоустановок указывают на целесообразность применения предложенного подхода для определения оптимальных значений почасового потребления энергоресурсов в рассматриваемой системе.

Ключевые слова: интегрированная система энергоснабжения, распределённая генерация, минимизация расходов, когенерационная технология, энергетический хаб.

Надійшла 11.03.2017

Received 11.03.2017

БІОЕЛЕКТРОХІМІЧНІ АСПЕКТИ ВИБОРУ ФОТОЕЛЕКТРОХІМІЧНОЇ СКЛАДОВОЇ ФОТОБІОЕЛЕКТРОХІМІЧНИХ СИСТЕМ

В статті розглянуто можливість використання фотоелектрохімічних елементів як джерела енергії для фотобіоелектрохімічної системи. Мета роботи полягає в розгляді фото- та біоелектрохімічних процесів, що відбуваються в фотобіоелектрохімічних системах, з точки зору оптимізації загальної продуктивності системи та теоретичному обґрунтуванні вибору матеріалу для фотоелектрохімічної складової фотобіоелектрохімічних систем. Проаналізовано реакції, що відбуваються в фотобіоелектрохімічних системах, які працюють за принципом чотирьохелектродної та двохелектродної системи, та потоки носіїв заряду, які беруть участь у формуванні струму в системі. Для визначення матеріалів, які найкраще підходять для використання в фотобіоелектрохімічних системах, проведено порівняльний аналіз найпоширеніших напівпровідників різних типів. Основними характеристиками напівпровідників, які враховували при визначенні придатності для поєднання з мікробним паливним елементом, були структура енергетичних рівнів та чутливість до світла у видимому спектрі. Визначено, що для використання в фотобіоелектрохімічній системі найкраще підходять Si, CdSe, CuInS₂, GaAs, MoS₂ та TaNO, CdS, Cu₂O, GaP, C₃N₄, SiC.

Ключові слова: фотобіоелектрохімічна система, екзоелектрогени, фотоелектрохімічний елемент, напівпровідник, біоанод, заборонена зона

Вступ та постановка завдання. Морально застарілі та екологічно-небезпечні технології, які базуються на використанні викопного палива, з кожним роком поступаються новим відновлювальним джерелам енергії як в сегменті промислового виробництва, так і в побуті. Велика кількість відходів, яка утворюється в процесі виробництва та використання енергоносіїв, вироблених з нафти, газу та вугілля, та їх беззаперечний негативний вплив на довкілля робить пошук та впровадження нових енергетичних технологій та ресурсів ключовим завданням сьогодення. Низка міжнародних угод, зокрема Паризька кліматична угода, спрямована на забезпечення сталого розвитку на Землі, включають положення, що стосуються зменшення викидів парникових газів, основна маса яких утворюється при спалюванні викопного палива та продуктів його переробки. Тому використання нових нетрадиційних джерел енергії та їх розробка є актуальним питанням світової енергетики. Фотобіоелектрохімічні системи базуються на принципі поєднання двох видів альтернативних джерел енергії – фотоелектрохімічних елементів, які дозволяють асимілювати сонячну енергію, та біоелектрохімічних систем, які за рахунок біологічної складової здатні ефективно вилучати енергію, яка міститься в органічних речовинах відходів та стічних вод, та перетворювати її у зручні для використання види енергоносіїв – електроенергію або водень.

Біоелектрохімічні системи (або мікробні паливні елементи) функціонують за рахунок життєдіяльності мікроорганізмів, які належать до специфічної групи електрохімічно-активних мікроорганізмів – екзоелектрогенів. У процесі життєдіяльності екзоелектрогени окиснюють органічні речовини шляхом анаеробного дихання, в результаті чого можуть генерувати і виділяти назовні клітини електрони і іони Гідрогену. В штучно створеній системі можливе перенесення цих електронів на анод мікробного паливного елемента (МПЕ), внаслідок чого в колі МПЕ протікає струм. В анаеробних умовах на катоді біоелектрохімічної системи (БЕХС) можливе виділення молекулярного водню, проте для забезпечення цього процесу важливою умовою є прикладання додаткової напруги в електричне коло для створення необхідного для утворення молекули водню електрохімічного потенціалу на катоді.

Для забезпечення незалежності біоелектрохімічної системи від зовнішніх енергетичних ресурсів запропоновано використовувати фотоелектрохімічні елементи або їх складові. Ці комбіновані системи отримали назву фотобіоелектрохімічні системи (ФБЕХС) або фотоелектрохімічні мікробні паливні елементи (ФМПЕ). Таким чином, фотобіоелектрохімічні системи (фотоелектрохімічні мікробні паливні елементи) – це системи, в яких енергія, яка отримана в результаті життєдіяльності електрохімічно-

активних бактерій, поєднується з сонячною енергією, яка асимільована фотоелектрохімічним паливним елементом.

Процес утворення водню, який відбувається в фотобіоелектрохімічних системах, в загальних рисах нагадує аналогічний процес фоторозкладання води [1], проте його суттєвою відмінністю є використання молекул органічних речовин, а не води як джерела протонів.

Серед досліджень, які використовують фотоелектрохімічні елементи повністю, варто виділити ФБЕХС з сенсibilізованими барвниками сонячними елементами (СБСЕ) [2, 3]. Система складається з чотирьох електродів. Два електроди біоелектрохімічної системи: біоанод, виготовлений з вуглецевого матеріалу (паперу, тканини, волокна), з іммобілізованою на ньому біоплівкою електрохімічно-активних мікроорганізмів та катод, на якому відбувається відновлення водню. Фотоелемент також має два електроди: фотокатод, виготовлений з фоточутливого матеріалу, та металевий анод.

В СБСЕ фотокатод виготовлений з оксиду титану, покритого світлочутливим барвником, (наприклад, поліпіридилним комплексом рутенію, осмію або стануму) [2, 3]. Під дією світла електрони в молекулах барвника переходять у збуджений стан і рекомбінують з дірками, утвореними в діоксиді титану внаслідок фотоефекту. Через внутрішній шар, який заповнений редокс парою йодид-трийодид, електрони переходять на робочий електрод сонячного елемента, звідки – на катод БЕХС. Електрони, які генерують електрохімічно-активні мікроорганізми на біоаноді, в свою чергу, заміщують електрони, які утворилися при збудженні барвника світлом. Додаткова напруга, яка генерується сонячним елементом, зменшує потенціал катода БЕХС до рівня, при якому відновлення водню стає термодинамічно можливим.

Новий підхід до вирішення проблеми додаткового джерела енергії запропоновано в [4]. ФБЕХС складається з мікробного паливного елемента та фотоелектрохімічного елемента. Мікробний паливний елемент виготовлений у вигляді двокамерного реактора, розділеного протонпроникною мембраною, з біоанодом з вуглецевої тканини, та катодом, виготовленим з вуглецевої тканини з електрохімічно іммобілізованими частинками платини (Рис 1). Фотоелектрохімічний елемент – однокамерна система з фотоанодом з діоксиду титану (напівпровідник n-типу) та платиновим катодом. Особливістю системи є те, що біоанод з'єднаний з катодом фотоелемента, а фотоанод з катодом мікробного паливного елемента. Виділення водню відбувається на катоді фотоелемента за участі електронів, які генерують мікроорганізми на біоаноді мікробного паливного елемента. На фотоаноді відбувається реакція фоторозкладання води з утворенням атомів кисню та протонів. Суттєвим недоліком описаної системи є утворення кисню і водню в одній камері, що призводить до утворення вибухонебезпечних сумішей.

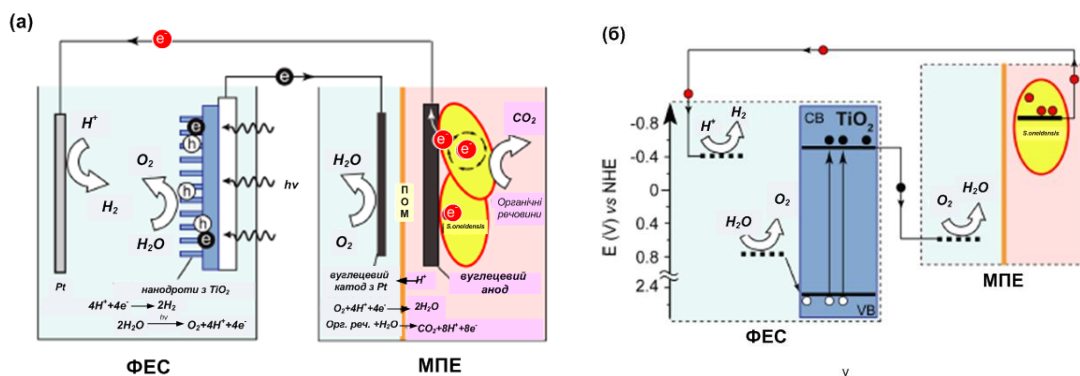


Рисунок 1 – а – схема функціонування ФБЕХС [4]; б – схема розміщення енергетичних рівнів та перенесення електронів у ФБЕХС з фотокатодом з TiO_2

В багатьох дослідженнях розглядається поєднання біоелектрохімічної системи з окремим фотокатодом. Використання лише фотокатода дозволяє спростити систему – перетворити з чотирьохелектродної (біоанод і катод біоелектрохімічної системи та фотокатод та анод фотоелектрохімічної системи) в двоелектродну (біоанод і фотокатод). Можливе використання напівпровідників n- і p- типу. Виділення водню відбувається безпосередньо на поверхні фотокатода, зануреного в безкисневий електроліт, при цьому роль p-n переходу виконує межа поділу фаз напівпровідник/катодний розчин [1, 5].

Розроблена в [6] фотобіоелектрохімічна система складається з біоанода, виготовленого з вуглецевої тканини з іммобілізованою біоплівкою, яка сформована з чистої культури електрохімічно-активних

мікроорганізмів *Shewanella oneidensis* MR-1, та фотокатода, виготовленого з оксиду Купруму Cu_2O (Рис.2 (а)). Оксид Купруму є напівпровідником р-типу з шириною забороненої зони 2,2 еВ та структурою енергетичних зон: $-0,69$ В – зона провідності, $1,51$ В – валентна зона. Для збільшення площі поверхні фотокатод виготовлений у вигляді пластини, покритої нанодротоми.

При освітленні фотокатода світлом з енергією квантів більшою за ширину забороненої зони, електрони набувають енергію, яка достатня для переходу їх в зону провідності напівпровідника. Оскільки в напівпровідниках р-типу основними носіями заряду є дірки, то струм, який виникає в фотокатоді, протікає за рахунок дірок. Електрони ж, виконуючи роль неосновних носіїв заряду, відновлюють водень на межі поділу фаз фотокатод/катодний розчин. Біоанод в даному випадку виступає протиелектродом, потенціал якого зумовлюється біохімічними реакціями, які здійснюють електрохімічно-активні мікроорганізми в процесі анаеробного окиснення органічних речовин.

Для використання напівпровідникових матеріалів в ФБЕХС важливе значення має розподіл енергетичних рівнів напівпровідника. В такій гібридній ФБЕХС енергія нижнього краю зони провідності близька до $-0,69$ В, що забезпечує можливість відновлення водню на межі поділу фаз фотокатод/катодний розчин [6]. Значення потенціалу анода визначається потенціалом реакції окиснення органічної речовини та потенціалом цитохромів на зовнішній мембрані клітин електрохімічно-активних мікроорганізмів. Для описаної системи значення потенціалу анода більш негативне ($-0,3$ В) ніж значення енергії верхнього краю валентної зони фотокатода, в якій зосереджуються дірки. Така різниця потенціалів електродів робить можливим протікання струму в зовнішньому колі за рахунок електронів, утворених електрохімічно-активними мікроорганізмами. Схема розподілу енергетичних рівнів та переносу електронів в ФБЕХС з Cu_2O – фотокатодом зображена на рис. 2(б).

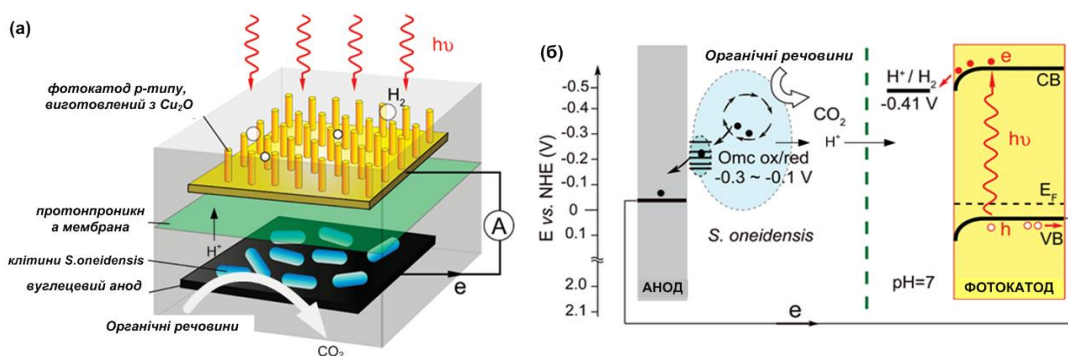


Рисунок 2– а – схема функціонування ФБЕХС [6]; б – схема розміщення енергетичних рівнів та перенесення електронів у ФБЕХС з фотокатодом з Cu_2O

Проте, не лише напівпровідники р-типу використовують як фотокатоли. Успішне використання TiO_2 (рутилу), показано в [7, 8]. TiO_2 – напівпровідник n-типу з шириною забороненої зони $3,2\text{--}3,35$ еВ. При поєднанні його з біоанодом, на якому іммобілізовані клітини *Shewanella oneidensis* MR1, продемонстровано виділення водню. Причому в експерименті показано, що отримати водень в системі біоанод-фотокатод можливо лише при виконанні трьох умов: наявності мікроорганізмів, субстрату та при опроміненні фотокатода світлом.

Окрім двох- та чотириелектродних фотобіоелектрохімічних систем існують також триелектродні, які складаються з двох електродів біоелектрохімічної системи (біоанод та катод) та фотоелектрода (звичай n-типу). Проте, такі системи зазвичай використовують для отримання не водню, а електроенергії. Оскільки продуктивність біоелектрохімічних систем часто лімітується швидкістю рекомбінації молекул на катоді мікробного паливного елемента, в багатьох випадках для підвищення швидкості реакції утворення молекули води достатньо зменшити потенціал катода. З цією метою в роботі використано послідовно підключений фотокатод, виготовлений з напівпровідника n-типу. Електрони, які генеруються при опроміненні напівпровідникового фотокатода світлом і надходять в зовнішнє електричне коло, значно знижують окисно-відновний потенціал катода біоелектрохімічної системи, що сприяє підвищенню швидкості катодної реакції. Особливий інтерес при дослідженні роботи триелектродних ФБЕХС викликають побічні процеси, які можуть відбуватися на фотокатоді. Наприклад, при використанні фотоелектрода з титану діоксиду, з'єднаного з біоанодом, можливе отримання метану з CO_2 [9].

Загалом, система працює як біоелектрохімічна система для отримання електричної енергії, яка складається з двох електродів мікробного паливного елемента та фотокатода з напівпровідника n-типу TiO_2 , під'єднаного в зовнішнє електричне коло МПЕ. Фотострум, який виникає в фотокатоді при

освітленні, надходить в коло мікробного паливного елемента. Зменшення потенціалу катода сприяє збільшенню швидкості рекомбінації протонів з молекулами кисню. В напівелемент фотокатода подають вуглекислий газ. На межі поділу фаз відбувається реакція утворення метану з вуглекислого газу та води. Електрони, які утворюються в цій реакції, заміщують дірки в валентній зоні фотокатода.

Подібний принцип роботи і у фотобіоелектрохімічної системи, в якій, окрім генерування електричної енергії, відбувається руйнування барвника метиленового синього [10]. В однокамерному МПЕ біоанод з'єднаний з катодом та додатково з фотокатодом. Руйнування метиленового синього відбувається як за рахунок діяльності мікроорганізмів, так і за рахунок взаємодій з продуктами вільнорадикальних реакцій, що утворюються на фотокатоді при збудженні напівпровідника світлом.

Таким чином, використання фотоелектрохімічних систем чи їх окремих складових знайшло широке застосування в технології мікробних паливних елементів і має великий потенціал для подальших досліджень.

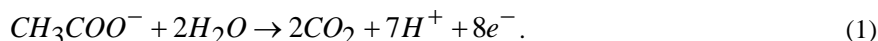
Серед основних проблем, які виникають при розробці фотобіоелектрохімічних систем важливе місце посідає вибір матеріалу напівпровідника.

Мета роботи полягає в аналізі фото- та біоелектрохімічних процесів, що відбуваються в фотобіоелектрохімічних системах, з точки зору оптимізації загальної продуктивності системи та теоретичному обґрунтуванні вибору матеріалу для фотоелектрохімічної складової фотобіоелектрохімічних систем.

Результати та обговорення

Як зазначалося, відновлення водню на катоді біоелектрохімічної системи можливе лише за використання додаткового джерела енергії, оскільки електронів, які генерують електрохімічно-активні мікроорганізми, що іммобілізовані на аноді, не вистачає для забезпечення електрохімічного потенціалу, необхідного для відновлення водню. Неможливість самочинного утворення водню в біоелектрохімічній системі впливає з термохімічних розрахунків, зокрема з розрахунку зміни вільної енергії Гіббса.

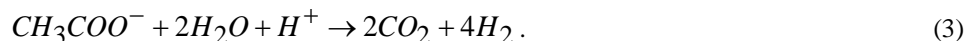
За використання ацетату натрію як поживного субстрату реакція, яку здійснюються електрохімічно-активні мікроорганізми на аноді буде описуватися рівнянням:



Катодна реакція відновлення водню:



Тоді сумарна реакція має вигляд:



Зміну енергію Гіббса для реакції утворення водню з ацетату можна розрахувати за наступним рівнянням[11]:

$$\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S, \quad (4)$$

де ΔH - зміна ентальпії реакції утворення водню з ацетату, яка розраховується за формулою:

$$\Delta H = (4 \cdot \Delta H_{298}^\circ H_2 + 2 \cdot \Delta H_{298}^\circ CO_2) - (\Delta H_{298}^\circ CH_3COO^- + 2 \cdot \Delta H_{298}^\circ H_2O); \quad (5)$$

ΔS - зміна ентропії реакції утворення водню з ацетату, яка розраховується за формулою:

$$\Delta S = (4 \cdot S_{298}^\circ H_2 + 2 \cdot S_{298}^\circ CO_2) - (S_{298}^\circ CH_3COO^- + 2 \cdot S_{298}^\circ H_2O). \quad (6)$$

В таблиці 1 наведені стандартні ентальпії та ентропії утворення продуктів та вихідних речовин для реакції 3, та розраховані значення зміни ентальпії та ентропії цієї ж реакції відповідно до (5) і (6).

Таблиця 1 - Стандартні ентропії та ентальпії утворення продуктів і реагентів [12] для реакції отримання водню з ацетату

Речовина	ΔH_{298}° , кДж/моль	S_{298}° , Дж/(моль·К)
H ₂	0	130,59
CO ₂	-393,511	213,65
H ₂ O(рід.)	-285,84	69,96
CH ₃ COO ⁻	-485,64	87,58
	$\Delta H = 270, 298$, кДж/моль	$\Delta S = 772,16$, Дж/(моль·К)

Підставляючи отримані значення ΔH та ΔS в рівняння (4), отримуємо значення зміни вільної енергії Гіббса для реакції утворення водню, яке становить:

$$\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S = 270,298 \cdot 10^3 - 298 \cdot 772,16 = 55094,32, \text{ Дж/моль.} \quad (7)$$

Позитивне значення зміни вільної енергії Гіббса свідчить про те, що за даних умов реакція самочинно відбуватися не буде, тобто для отримання водню в біоелектрохімічній системі потрібно долучати додаткову енергію.

Для того, щоб визначити значення напруги у колі біоелектрохімічної системи, яке необхідне для забезпечення процесу відновлення водню на катоді, можна скористатися рівнянням Нернста.

Визначити окисно-відновний потенціал електрода за рівнянням Нернста можна використовуючи наступний вираз:

$$E = E^0 + \frac{RT}{nF} \ln \frac{a_{ок}}{a_{від}}, \quad (8)$$

де E – електродний потенціал для умов, за яких відбувається реакція, В; E^0 – стандартний електродний потенціал, В; $R = 8,31$ – універсальна газова стала, Дж/(моль·К); T – абсолютна температура, К; n – число електронів, що бере участь у реакції, $F = 96485$ – стала Фарадея, Кл/моль; $a_{ок}$ – активність окисненої форми речовини; $a_{від}$ – активність відновленої форми речовини.

За умови, що на катоді відбувається реакція відновлення водню, окисно-відновний потенціал катода при рН 7 і тиску водню $p_{H_2} = 1$ атм буде визначатися як:

$$E_{H^+/H_2} = E_{H^+/H_2}^0 + \frac{RT}{2 \cdot F} \ln \frac{[H^+]^2}{p_{H_2}} = 0 + \frac{8,31 \cdot 298}{2 \cdot 96485} \ln \frac{[10^{-7}]^2}{1} = -0,414. \quad (9)$$

Відповідно до літературних даних [13], окисно-відновний потенціал напівреакції окиснення ацетату до CO_2 становить $-0,29$ В. Тоді електрорушійна сила біоелектрохімічної системи, в якій відбувається окиснення ацетату з утворенням водню, буде розраховуватися за формулою:

$$E_{PC} = E_{кат} - E_{ан} = E_{H^+/H_2} - E_{CO_2/CH_3COO^-} = -0,414 - (-0,29) = -0,124 \text{ В.} \quad (10)$$

Тобто теоретичне додаткове значення напруги, яке необхідне для виділення водню на катоді біоелектрохімічної системи, становить $-0,124$ В. Враховуючи, що певна частина енергії, отриманої в процесі окиснення ацетату електрохімічно-активними мікроорганізмами, витрачається на власні енергетичні потреби клітини, потенціал біоанода зазвичай менш негативний, ніж теоретично розрахований, і знаходиться в межах від $-0,2$ В до $-0,28$ В [14]. Виходячи з цього, додаткова напруга, яку необхідно прикласти для забезпечення виділення водню на катоді біоелектрохімічної системи, становить від $-0,13$ В до $-0,21$ В.

Менше значення анодного потенціалу також пов'язане з тим, що процес окиснення ацетату відбувається не безпосередньо на аноді, а всередині клітин електрохімічно-активних мікроорганізмів, частина його втрачається при перенесенні електронів з клітини назовні та від зовнішньої мембрани до анода. При прямому перенесенні електрона від клітини до анода для забезпечення функції перенесення електронів потенціал цитохромів зовнішньої мембрани має бути більший від окисно-відновного потенціалу реакції окиснення ацетату ($-0,3$ ÷ $-0,1$ В для *Shewanella oneidensis*) [6]. Медіатори, як штучні, так і ті, які клітини синтезують самостійно, «транспортують» електрони від первинних акцепторів в клітинах мікроорганізмів, таких як НАДН ($-0,32$ В), ферредоксину ($-0,42$ В), глутатіону ($-0,24$ В), до анода біоелектрохімічної системи [15, 16]. Найбільш поширеними сполуками, які мають властивості медіаторів, є похідні феназину [15], окисно-відновний потенціал яких коливається в широких межах і становить від $-0,032$ В [16] до $-0,34$ В [17] (для похідних феназину, які синтезують *Pseudomonas aeruginosa*) і загалом є більш позитивним, ніж окисно-відновний потенціал первинних акцепторів електронів. Високе значення окисно-відновного потенціалу медіаторів сприяє перенесенню електронів назовні клітини, проте часто значно знижує потенціал анода та загальну продуктивність системи за струмом.

Для ефективної роботи фотобіоелектрохімічної системи матеріал, з якого виготовлений фотокатод, повинен мати підходящу для компонування з мікробним паливним елементом структуру енергетичних рівнів. Зокрема, енергія нижнього краю зони провідності має бути більш негативною ніж електрохімічний потенціал відновлення водню на катоді ($-0,414$ В). Крім того, важливо, щоб енергія верхнього краю валентної зони була більш позитивною, ніж потенціал анода ($-0,2$ В – $-0,28$ В). Значення окисно-відновного потенціалу анода, в свою чергу, залежить від значення окисно-відновного потенціалу

реакції окиснення субстрату та виду перенесення електронів до анода. При прямому перенесенні електронів від клітин до анода визначальним буде потенціал цитохромів зовнішньої мембрани клітин електрохімічно-активних мікроорганізмів, а при опосередкованому перенесенні (перенесення за допомогою медіаторів) – потенціал окиснення розчинних медіаторів

На рис. 3 наведена характеристика розподілу енергетичних рівнів у напівпровідниках різних типів.

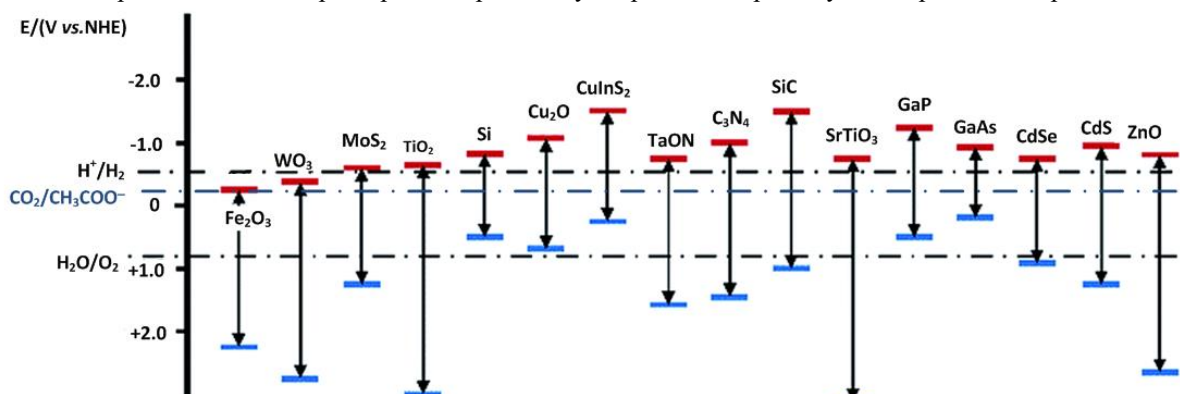


Рис. 3 Характеристика розподілу енергетичних рівнів у напівпровідниках [18]

Виходячи з вищенаведеного, серед найбільш поширених напівпровідників для використання в фотобіоелектрохімічних системах підходять Si, Cu₂O, TiO₂, ZnO, CdS, TaNO, MoS₂, CuInS₂, C₃N₄, SiC, GaP, GaAs, CdS.

Важливою характеристикою при виборі фоточутливого матеріалу є ширина забороненої зони напівпровідника. Генерування носіїв заряду в напівпровіднику відбувається при освітленні світлом з енергією квантів більшою ніж ширина забороненої зони. Оскільки енергія фотона залежить від довжини хвилі світла, то, знаючи ширину забороненої зони напівпровідника, можна визначити довжини хвиль, при яких у ньому буде виникати явище фотоефекту. Енергію фотона можна розрахувати за формулою:

$$\varepsilon = h\nu = h \frac{c}{\lambda}, \tag{11}$$

де ε – енергія фотона; ν – частота світлової хвилі; $h = 0,4139 \cdot 10^{-16}$ – стала Планка, еВ·с, ($6,63 \cdot 10^{-34}$, Дж·с); $c = 3 \cdot 10^8$ – швидкість світла, м/с; λ – довжина хвилі світла, м.

Тоді, якщо виразити ширину забороненої зони як енергію світлового випромінювання, то напівпровідник буде чутливий до світла з довжиною, меншою за λ , розрахувати яку можна за формулою:

$$\lambda = \frac{hc}{\varepsilon} = \frac{1,24 \cdot 10^{-6}}{\varepsilon}, \text{ еВ.} \tag{12}$$

У таблиці 2 приведені значення енергії, яка характеризує ширину забороненої зони для напівпровідникових матеріалів, які найчастіше використовуються для виготовлення фотоелементів, та максимальні значення довжини хвилі, при яких матеріал фоточутливий.

Таблиця 2 - Значення енергії, яка характеризує ширину забороненої зони [18], та довжини хвиль світла, які мають відповідну енергію

Матеріал	E _{зз} , еВ	λ, нм	Матеріал	E _{зз} , еВ	λ, нм	Матеріал	E _{зз} , еВ	λ, нм
CdSe*	1,7	729	ZnO	3,3	376	GaP**	2,25	551
Fe ₂ O ₃ **	2,1	590	CdS**	2,4	517	InSb*	0,17	7294
WO ₃ **	2,6	477	TaNO**	2,4	517	Ge*	0,66	1879
Bi ₂ WO ₆ **	2,8	443	Si*	1,1	1127	C₃N₄**	2,7	459
BiVO ₄ **	2,4	517	Cu₂O**	2,2	564	SiC**	3	413
TiO₂	3,2	388	GaAs*	1,4	886	MoS₂*	1,75	709
CuInS₂*	1,1-2,5	1127-496	SrTiO ₃	3,2	388			

*матеріали, активні в усій області видимого світла;

**матеріали, активні в частині області видимого світла;

жирним шрифтом виділені матеріали, які підходять для використання в фотобіоелектрохімічних системах за зонною структурою.

Сонячне світло має довжини хвиль в діапазоні $10 \div 2000$ нм, причому видима частина спектру включає хвилі з довжиною $390 \div 750$ нм, ультрафіолетова $100 \div 400$ нм, інфрачервона – 750 нм $\div 2000$ мкм. Сонячне випромінювання, яке досягає поверхні Землі, має довжини хвиль, які знаходяться в інфрачервоному діапазоні ($\approx 50\%$) та області видимого світла ($\approx 40-45\%$), решта припадає на ультрафіолетове випромінювання [19]. Тому фоточутливість матеріалу в видимій та інфрачервоній області спектру є одним з факторів, що зумовлюють вибір напівпровідника для фотобіоелектрохімічних систем.

Відповідно до даних, приведених в таблиці 2 та на рис. 3, оптимальними, з точки зору ефективності світлопоглинання в видимій області спектру сонячного випромінювання та відповідності зонної структури матеріалу окисно-відновним реакціям біоелектрохімічної системи, є наступні напівпровідникові матеріали: CdSe, CuInS₂, Si, GaAs, MoS₂, які мають здатність поглинати світло в усьому видимому діапазоні, та TaNO, CdS, Cu₂O, GaP, C₃N₄, SiC, які є активними не в усій області спектру видимого світла.

При виборі матеріалу для виготовлення фотоелектрохімічних елементів керуються зазвичай значенням ККД для матеріалу, вартістю, простотою виготовлення та експлуатації матеріалу, а також стабільністю роботи елемента протягом терміну експлуатації.

Серед відомих на сьогодні матеріалів для виготовлення фотоелементів в широкий вжиток увійшли кремнієві фотоелементи та тонкоплівкові, до яких входять фотоелементи на основі аморфного кремнію (a-Si), CdTe, CuInGaSe₂, GaAs, InP, CdSe, Cu₂Se, Cu₂O та ін. До тонкоплівкових також відносять сенсibilізовані барвниками сонячні елементи. Тонкоплівкові ФЕС мають найменшу вартість серед матеріалів, проте ККД для них не перевищує 5-12%, а отже, в порівнянні з іншими матеріалами, вони потребують значно більшої площі для розміщення робочих модулів [20, 21].

Для кремнієвих ФЕС ККД становить 15-17% для полікристалічного кремнію і до 22% для монокристалічного кремнію [20, 21].

Не зважаючи на вищу вартість, 80 % світового ринку сонячних батарей займають фотоелементи на основі кристалічного кремнію. Причому зазвичай виробники віддають перевагу полікристалічному, оскільки нижчий ККД зазвичай компенсується більшою стабільністю роботи при розсіяному світлі, меншою вартістю та простішою технологією виробництва.

Висновки. Використання фотоелектрохімічних елементів як джерела додаткової енергії в біоелектрохімічних системах для отримання водню є перспективним шляхом розвитку для цієї галузі біоенергетики. Поєднання сонячної енергії, асимільованої фотоелектрохімічним елементом, з енергією, яку електрохімічно-активні мікроорганізми генерують в процесі метаболічного перетворення органічних речовин, забезпечує автономне, незалежне від зовнішніх джерел енергії, функціонування фотобіоелектрохімічної системи.

Практично всі типи фоточутливих матеріалів можуть бути використані в технології фотобіоелектрохімічних систем. Проте, для забезпечення максимальної продуктивності та бажаного економічного ефекту, вибір фотоелектрохімічного елемента має базуватися на основі аналізу технологічних, фізико-хімічних та економічних показників фоточутливих матеріалів.

На основі даних, представлених в статті, найкраще для використання в фотобіоелектрохімічних системах підходять Si, CdSe, CuInS₂, GaAs, MoS₂ та TaNO, CdS, Cu₂O, GaP, C₃N₄, SiC. Зважаючи на вищезазначені переваги використання та поширеність, кристалічний кремній і арсенід галію є ідеальними варіантами для фотоактивної складової фотобіоелектрохімічних систем.

Список використаної літератури

- 1 Зубченко Л. С. Світлозалежне отримання водню в паливних та біопаливних елементах / Л. С. Зубченко, С. В. Кузьмінський // Відновлювальна енергетика. – 2015. – Вип. 4. – С. 85-92.
2. Ajayi F. F. Study of hydrogen production in light assisted microbial electrolysis cell operated with dye sensitized solar cell / F. F. Ajayi, K. Y. Kim, K.-J. Chae, M. J. Choi, S. Y. Kim, I. S. Chang, I. S. Kim // International Journal of Hydrogen Energy.– 2009. – Vol. 34, №. 23.– P. 9297–9304.
3. Ajayi F. F. Optimization studies of bio-hydrogen production in a coupled microbial electrolysis-dye sensitized solar cell system / F. F. Ajayi, K. Y. Kim, K. J. Chae, M. J. Choi, S. Y. Kim, I. S. Chang, I. S. Kim // Photochemical photobiological sciences: Official journal of the European Photochemistry Association and the European Society for Photobiology. – 2010. – Vol. 9, – №. 3.– P. 349–356.
- 4 Wang H. Self-biased solar-microbial device for sustainable hydrogen generation / H. Wang, F. Qian, G. Wang, Y. Jiao, Z. He, Y. Li // ACS Nano. – 2013. – Vol. 7. – № 10. – P. 8728–8735.

5. Кузьмінський С. В. Нетрадиційні електрохімічні системи перетворення енергії. Фото-, термо- та біопаливні елементи: Навчальний посібник. / С. В. Кузьмінський., Г. Я. Колбасов, Я. Ю. Тевтуль, Н. Б. Голуб. – Чернівці : Рута, – 2003. – 96с.
6. Qian F. Solar-driven microbial photoelectrochemical cells with a nanowire photocathode / F. Qian, G. Wang, Y. Li // *NanoLett.* – 2010. – № 10. – P 4686–4691.
7. Lu A. Microbial fuel cell equipped with a photocatalytic rutile-coated cathode / A. Lu, Y. Li, S. Jin, H. Ding, C. Zeng, X. Wang, C. Wang // *Energy Fuels.* – 2009. – №24 (2). – P. 1184–1190.
8. Chen Q.Y. Hydrogen production on TiO₂ nanorod arrays cathode coupling with bio-anode with additional electricity generation/ Q.Y. Chen, J. S. Liu, Y. Liu, Y.H. Wang // *Journal of Power Sources.* – 2013. – № 238. – P. 345–349.
9. Kim H. W. Photocoupled bioanode: a new approach for improved microbial fuel cell performance / H. W. Kim, K. S. Lee, A. Razzaq, S. H. Lee, C. A. Grimes, S. I. In // *Energy Technol.* – 2018. – Vol. 6. – P. 257 – 262.
10. Lee S. H. Wastewater treatment and electricity generation from a sunlight-powered single chamber microbial fuel cell / S. H. Lee, K. S. Lee, S. Sorcar, A. Razzaq, C. A. Grimes, S. I. In // *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry.* – 2017. – 9 p.
11. Kuzminskiy Ye. Bioelectrochemical hydrogen and electricity production. Theoretical bases, description and modeling of the process. / Ye. Kuzminskiy, K. Shchurska, I. Samarukha, G. Lagod. – Lublin : Politechnica Lubelska, – 2013. – 102 p.
12. Глушко В. П. Термические константы веществ / Под ред. В. П. Глушко, – М. : ВИНТИ, – 1965-1982. – Вып. 1-10.
13. Yan J. Handbook of clean energy systems: 6 volume set / J. Yan. – Chichester: John Wiley & Sons, – 2015. – Vol. 5. – 4032 p.
14. Logan B. E. Microbial fuel cells: methodology and technology / B. E. Logan, B. Hamelers, R. Rozendal, U. Schröder, J. Keller, S. Freguia, P. Aelterman, W. Verstraete, K. Rabaey // *Environ. Sci. Technol.* – 2006. – Vol. 40 (17). – P. 5181–5192.
15. Rabaey K. Microbial phenazine production enhances electron transfer in biofuel cells / K. Rabaey, N. Boon, M. Höfte, W. Verstraete // *Environ. Sci. Technol.* – 2005. – Vol. 39 (9). – P. 3401–3408.
16. Price-Whelan A. Pyocyanin alters redox homeostasis and carbon flux through central metabolic pathways in *Pseudomonas aeruginosa* PA14 / A. Price-Whelan, L. E. P. Dietrich, D. K. Newman // *J. Bacteriol.* – 2007. – Vol. 189. – № 17. – P. 6372–6381.
17. Dietrich L. E. P. The phenazine pyocyanin is a terminal signaling factor in the quorum sensing network of *Pseudomonas aeruginosa* / L. E. P. Dietrich, A. Price-Whelan, A. Petersen, M. Whiteley, D. K. Newman // *Molecular Microbiology.* – 2006. – Vol. 61(5). – P. 1308–1321.
18. Zhao J. Hybrid catalysts for photoelectrochemical reduction of carbon dioxide: a prospective review on semiconductor/metal complex co-catalyst systems / J. Zhao, X. Wang, Z. Xu and J. S. C. Loo // *Journal of Materials Chemistry A.* – 2006. – vol. 2 – Is. 37. – P. 15228-15233.
19. Мусієнко М. М. та ін. Екологія: Тлумачний словник. – К.: Либідь, 2004. – 376 с.
20. Фреїк Д. М. Фотоелектричні перетворювачі сонячного випромінювання. Досягнення, сучасний стан і тенденції розвитку / Д. М. Фреїк, В. М. Чобанюк, М. О. Галушак, О. С. Криницький, Г. Д. Матеїк // *Фізика і хімія твердого тіла.* – 2012. – Т. 13. – №1. – С. 7–20.
21. Кожем'яко В. П. Аналітичний огляд сучасних технологій фотоелектричних перетворювачів для сонячної енергетики / В. П. Кожем'яко, О. Г. Домбровський, В. Ф. Жердецький, В. І. Маліновський, Г. В. Притуляк // *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології.* – 2011. – т. 22. – №20. – С. 141 – 157.

УДК 544.6:57+606:628

Л.С. Зубченко, ас., ORCID 0000-0002-2549-3185

С.В. Кузьминский, д-р. хим. наук, проф., ORCID 0000-0002-5632-8297

**Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»
БИОЕЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ВЫБОРА ФОТОКАТОДА ДЛЯ
ФОТОБИОЕЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ**

В статье рассмотрена возможность использования фотоэлектрохимических элементов, как источника дополнительной энергии для фотобиоэлектрохимической системы. Цель работы заключается в анализе фото- и биоэлектрохимических процессов, происходящих в фотобиоэлектрохимических системах с точки зрения оптимизации общей производительности системы и теоретическое обоснование выбора материала для фотоэлектрохимической составляющей фотобиоэлектрохимических систем. Проанализированы биоэлектрохимические и фотоэлектрохимические реакции, происходящие в

фотобіоелектрохімічних системах, працюючих по принципу чотирьохелектродної і двухелектродної системи і потоки носіїв заряду, що беруть участь у формуванні струму в системі. При визначенні матеріалів, найбільш підходящих для використання фотобіоелектрохімічних систем, враховували структуру енергетичних рівнів напівпровідника і чутливість до світла в видимій області спектра. Проведено порівняльний аналіз для різних типів напівпровідникових матеріалів і визначено, що для використання в фотобіоелектрохімічній системі краще за все підходять Si, CdSe, CuInS₂, GaAs, MoS₂ і TaNO, CdS, Cu₂O, GaP, C₃N₄, SiC.

Ключові слова: фотобіоелектрохімічна система, екзоелектрогени, кремнієвий фотоеlement, напівпровідник, біоанод, заборонена зона

L. Zubchenko, TF, ORCID 0000-0002-2549-3185

Ye. Kuzminskiy, Dr. Chem. Sc., Prof., ORCID 0000-0002-5632-8297

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

BIOELECTROCHEMICAL BACKGROUND OF PHOTOCATHODE SELECTION FOR PHOTOBIOELECTROCHEMICAL SYSTEM

In recent years, the global warming and high pollution level on our planet force scientists to look for new renewable energy sources. Photobioelectrochemical systems are new environmental-friendly technology that uses microorganisms to produce electricity or hydrogen with simultaneous organic degradation. The article analyses the peculiarities of application of photoelectrochemical elements as a source of additional energy for the photobioelectrochemical system. The purpose of the work is to analyze photo- and bioelectrochemical processes occurring in photobioelectrochemical systems and the theoretical background of the material choice for the photoelectrochemical component of photobioelectrochemical systems, in terms of maximizing the overall system productivity. The specific feature of photobioelectrochemical systems deals with the fact that electrochemical reactions, occurring on the electrodes, have different nature and driving force, so, the productivity of the system always depends on many factors: working conditions, electrode material, the species of microorganism etc. The working principle of different types of photobioelectrochemical systems were reviewed. Bioelectrochemical and photoelectrochemical reactions, that occur in a four-electrode and two-electrode system were described as well as the flows of charge carriers that are involved in the formation of current in the system. The structure of the energy levels and the light sensitivity in the visible spectrum were taken into account for the choice of semiconductor. Based on comparative analysis of different types of semiconductor materials, Si, CdSe, CuInS₂, GaAs, MoS₂ and TaNO, CdS, Cu₂O, GaP, C₃N₄, SiC were determined to be the most suitable semiconductors for photocathode manufacturing in photobioelectrochemical systems.

Keywords: photobioelectrochemical system, exoelectrogens, photoelectrochemical cell, semiconductor, bioanode, forbidden zone

References

1 L. S. Zubchenko and Ye. V. Kuzminskiy, “Svitlozalezne otrymannia vodnyu v palyvnyh ta biopalyvnyh elementah”, *Vidnovliuvalna enerhetyka*, no. 4, s. 85-92, 2015. / Л. С. Зубченко, Є. В. Кузьмінський, “Світлозалежне отримання водню в паливних та біопаливних елементах”, *Відновлювальна енергетика*, Вип. 4, с. 85-92, 2015.

2. F. F. Ajayi, K. Y. Kim, K.-J. Chae, M. J. Choi, S. Y. Kim, I. S. Chang, and I. S. Kim, “Study of hydrogen production in light assisted microbial electrolysis cell operated with dye sensitized solar cell” *Int J Hydrogen Energy*, vol. 34, no. 23, p. 9297-9304, 2009.

3. F. F. Ajayi, K. Y. Kim, K. J. Chae, M. J. Choi, S. Y. Kim, I. S. Chang, and I. S. Kim “Optimization studies of bio-hydrogen production in a coupled microbial electrolysis-dye sensitized solar cell system”, *Photochem. Photobiol. Sci.*, vol. 9, no. 3, p. 349-356, 2010.

4 H. Wang, F. Qian, G. Wang, Y. Jiao, Z. He, and Y. Li, “Self-biased solar-microbial device for sustainable hydrogen generation”, *ACS Nano*, vol. 7, no. 10, p. 8728-8735, 2013.

5. Ye. V. Kuzminskiy, H. Ya. Kolbasov, Ya. Yu. Tevtul, and N. B. Holub, *Netradytsiini elektrohimični systemy peretvorennya enerhii. Foto-, termo-, ta biopalyvni element: navchalnyi posibnyk*. Chernivtsi: Ruta, 2003. / С. В. Кузьмінський, Г. Я. Колбасов, Я. Ю. Тевтуль, та Н. Б. Голуб, *Нетрадиційні електрохімічні системи перетворення енергії. Фото-, термо- та біопаливні елементи: Навчальний посібник*. Чернівці: Рута, 2003.
6. F. Qian, G. Wang, and Y. Li “Solar-driven microbial photoelectrochemical cells with a nanowire photocathode”, *NanoLett.*, no. 10, p. 4686-4691, 2010.
7. A. Lu, Y. Li, S. Jin, H. Ding, C. Zeng, X. Wang, and C. Wang, “Microbial fuel cell equipped with a photocatalytic rutile-coated cathode”, *Energy Fuels*, vol. 24 (2), p. 1184-1190, 2009.
8. Q.Y. Chen, J. S. Liu, Y. Liu, and Y.H. Wang, “Hydrogen production on TiO₂ nanorod arrays cathode coupling with bio-anode with additional electricity generation”, *J. Power Sources*, no. 238, p. 345-349, 2013.
9. H. W. Kim, K. S. Lee, A. Razzaq, S. H. Lee, C. A. Grimes, and S. I. In, “Photocoupled bioanode: a new approach for improved microbial fuel cell performance”, *Energy Technol.*, vol. 6, p. 257-262, 2018.
10. S. H. Lee, K. S. Lee, S. Sorcar, A. Razzaq, C. A. Grimes, and S. I. In, “Wastewater treatment and electricity generation from a sunlight-powered single chamber microbial fuel cell”, *J. Photochem. Photobiol., A*, 9 p, 2017.
11. Kuzminskiy Ye., Shchurska K., Samarukha I., Lagod G., *Bioelectrochemical hydrogen and electricity production. Theoretical bases, description and modeling of the process*. Lublin: Politechnica Lubelska, 2013.
12. V. P. Hlushko, *Termicheskie konstanty veshchestv*, Moskva: VINITI, vol. 1-10, 1965-1982. / В. П. Глушко, *Термические константы веществ*. Москва: ВИНТИ, т. 1-10, 1965-1982.
13. J. Yan *Handbook of clean energy systems vol. 5*. Chichester: John Wiley & Sons, 2015.
14. B. E. Logan, B. Hamelers, R. Rozendal, U. Schröder, J. Keller, S. Freguia, P. Aelterman, W. Verstraete, and K. Rabaey “Microbial fuel cells: methodology and technology”, *Environ. Sci. Technol.*, vol. 40 (17), p. 5181-5192, 2006.
15. K. Rabaey, N. Boon, M. Höfte, and W. Verstraete, “Microbial phenazine production enhances electron transfer in biofuel cells”, *Environ. Sci. Technol.*, vol. 39 (9), p. 3401-3408, 2005.
16. A. Price-Whelan, L. E. P. Dietrich, and D. K. Newman, “Pyocyanin alters redox homeostasis and carbon flux through central metabolic pathways in *Pseudomonas aeruginosa* PA14”, *J. Bacteriol.*, vol. 189, no.17, p. 6372-6381, 2007.
17. L. E. P. Dietrich, A. Price-Whelan, A. Petersen, M. Whiteley, and D. K. Newman, “The phenazine pyocyanin is a terminal signaling factor in the quorum sensing network of *Pseudomonas aeruginosa*”, *Mol. Microbiol.*, vol. 61(5), p. 1308-1321, 2006.
18. J. Zhao, X. Wang, Z. Xu and J. S. C. Loo, “Hybrid catalysts for photoelectrochemical reduction of carbon dioxide: a prospective review on semiconductor/metal complex co-catalyst systems”, *J. Mat. Chem. A.*, vol. 2, Is. 37, p. 15228-15233, 2006.
19. М. М. Мусієнко та ін. *Екологія: Тлумачний словник*. Київ, Україна: Либідь, 2004. / М. М. Musiienko et al., *Ekolohiia: Tlumacjniy slovnyk*. Kyiv, Ukraina: Lybid, 2004.
20. D. M. Frezi, V. M. Chobaniuk, M. O. Halushchak, O. S. Krynytskyi, and H. D. Mateik, “Fotoelektrychni peretvoriuvachi soniachnoho vuprominiuvannya. Dosiahnennia, suchasnyi stan i tendentsii rozvytku”, *Pizyka i himiia tverdoho tila*, vol. 13, no. 1, s. 7-20, 2012. / Д. М. Фрезі, В. М. Чобанюк, М. О. Галушчак, О. С. Криницький, та Г. Д. Матеїк, “Фотоелектричні перетворювачі сонячного випромінювання. Досягнення, сучасний стан і тенденції розвитку”, *Фізика і хімія твердого тіла*, т. 13, №1, с. 7-20, 2012.
21. V.P. Kozhemiako, O.H. Dombrovskiy, V.F. Zherdetskiy, V.I. Malinivskiy, and H.V. Prytuliak, “Analitichnyi ohliad suchasnyh tehnolohii fotoelektrychnykh peretvoriuvachiv dlia soniachnoi enerhetyky”, *оптыко-електронні інформатиіно-енергетичні технології*, vol. 22, no. 20, s. 141-157, 2011. / В. П. Кожем'яко, О. Г. Домбровський, В. Ф. Жердецький, В. І. Маліновський, та Г. В. Притуляк, “Аналітичний огляд сучасних технологій фотоелектричних перетворювачів для сонячної енергетики”, *Оптыко-електронні інформаційно-енергетичні технології*, т. 22, №20, с. 141-157, 2011.

Надійшла 16.03.2018

Received 16.03.2018

ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ENERGY EFFICIENCY AND ENERGY SAVING

УДК 621.311.01

В.В. Зорин, д-р техн. наук, проф., ORCID 0000-0001-5913-401X,

Ю.М. Мацкевич, магистр, ORCID 0000-0002-1095-3791,

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

КОМПЕНСАЦИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В СТОЯКАХ ВЫСОТНЫХ ЗДАНИЙ

Разработан метод определения мест установки и мощности батарей конденсаторов на основе данных измерений потерь напряжения на характерных участках схемы электрической сети. Приведен алгоритм расчета таких параметров режима, как потери активной мощности ΔP и реактивной мощности ΔQ в электрической сети 0,38 кВ зданий высотной застройки города. Рассмотрен пример расчета для многоэтажного дома данным методом. Преимуществами предложенного метода определения мест установки и мощности батарей конденсаторов является простота и возможность компенсировать реактивную мощность непосредственно у бытовых потребителей.

Ключевые слова: расчетная схема, параметры режимов, компенсация реактивной мощности, конденсаторные батареи, потери мощности, потери напряжения.

Введение. В настоящее время проблема компенсации реактивной мощности у потребителей является актуальной темой. Стремительное развитие современной техники и технологий обуславливает рост электропотребления в бытовом секторе. При нормальных рабочих условиях все потребители электрической энергии, режим которых сопровождается постоянным возникновением электромагнитных полей (электродвигатели стиральных машин и кондиционеров, блоки питания компьютеров, люминесцентные лампы и т. д.), нагружают сеть как активной, так и реактивной составляющими полной потребляемой мощности. Учитывая высокую плотность коммунально-бытовой нагрузки, постоянное наличие перетоков мощности реактивной составляющей приводит к значительным потерям электроэнергии в распределительных сетях крупных городов [1, 6]. В распределительных сетях коммунально-бытовых потребителей устройства компенсации реактивной мощности применяются недостаточно, хотя по объемам потребления этот сектор уже занимает второе место после промышленности [6].

Объектом исследования в данной работе являются электрические распределительные сети напряжением 0,38 кВ районов города с многоэтажной застройкой.

Целью и задачами данной работы является разработка усовершенствованного метода определения мест установки и мощности батарей конденсаторов на основе данных измерений потерь напряжения на характерных участках схемы электрической сети. В зависимости от модели, метода и критерия оптимизации могут быть получены различные результаты. Для электрических распределительных сетей городов с многоэтажной застройкой целесообразней применить метод выбора места установки батарей конденсаторов в линиях с равномерно распределенной нагрузкой [5]. А так же один из известных способов определения потерь мощности и электроэнергии в сетях 0,38 кВ, который основан на использовании корреляционной связи между потерей напряжения и потерей мощности в сети называется методом коэффициента $K_{мн}$ [3].

Исходные данные для решения поставленной задачи на примере 16-ти этажного жилого дома (рис. 1) с 3-я секциями и с 3-я квартирами на этаже. В квартирах используются электроплиты мощностью 8,5 кВт, $\cos\varphi = 0,8$ и $x_0=0$.

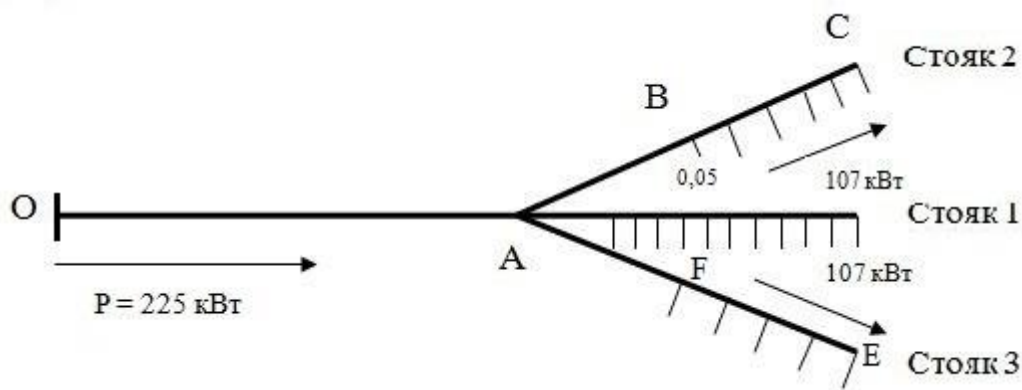


Рисунок 1 – Исходная схема сети 0,38 кВ 16-ти этажного жилого дома

Рассмотрим стояк 1 (рис. 1): общее число квартир $n = 16 \cdot 3 = 48$, удельная нагрузка на квартиру согласно [2] $P_{уд} = 2,23$ кВт/кв., нагрузка $P_I = 2,23 \cdot 48 = 107$ кВт.

Реактивную мощность вычисляем по формуле (1):

$$Q_I = P_I \cdot \operatorname{tg} \varphi \quad (1)$$

$$Q_I = 107 \cdot 0,75 = 80 \text{ кВАр}$$

Полная мощность составит $S_k = \sqrt{107^2 + 80^2} = 133,6$ кВА, $S = 107 - j80$, ток определим по формуле (2):

$$I = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U} \quad (2)$$

$$I = \frac{133,6}{\sqrt{3} \cdot 0,38} = 203 \text{ А.}$$

Линия стояка 1 выполнена проводом АПВ 4×95 в трубе, для которой активное сопротивление составляет $r_0 = 0,326$ Ом/км.

Стояки 1, 2, 3 общее число квартир $n_{\Sigma} = 48 \cdot 3 = 144$ квартиры, удельная нагрузка на квартиру [2] составит $P_{уд} = 1,56$ кВт/кв., нагрузка $P_{OA} = 1,56 \cdot 144 = 225$ кВт, ток рассчитываем по формуле (3):

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos \varphi} \quad (3)$$

$$I = \frac{225}{\sqrt{3} \cdot 0,38 \cdot 0,8} = 428 \text{ А.}$$

От ТП к вводу дома подходит двухцепная КЛ, для которой погонное активное сопротивление составляет $r_0 = \frac{0,326}{2} = 0,163$ Ом/км.

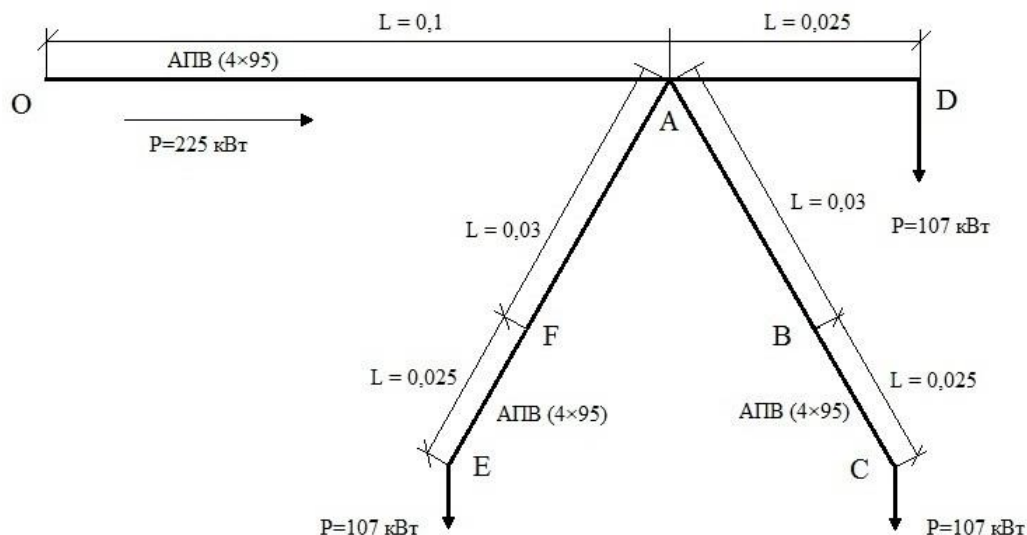


Рисунок 2 – Расчетная схема для определения $\Delta U\%$

Определим потерю напряжения на участке схемы сети OA со сосредоточенной нагрузкой по формуле (4):

$$\Delta U = \frac{\sqrt{3} \cdot I_i \cdot r_{0i} \cdot l_i}{10 \cdot U_n} \% , \quad (4)$$

где I_i – ток на i -м участке, А;

r_{0i} – погонное сопротивление i -го участка, Ом;

l_i – длина участка, км;

U_n – номинальное напряжение, кВ.

А так же на участках со сосредоточенное нагрузкой AB и AF по формуле (4) (рис. 2).

$$\Delta U_{OA} = \frac{\sqrt{3} \cdot 428 \cdot 0,163 \cdot 0,1}{10 \cdot 0,38} = 3,2\% , \quad \Delta U_{AB} = \Delta U_{AF} = \frac{\sqrt{3} \cdot 203 \cdot 0,326 \cdot 0,03}{10 \cdot 0,38} = 0,9\% .$$

Потерю напряжения на участках BC, AD, FE с равномерно распределенной нагрузкой рассчитываем по формуле (5):

$$\Delta U = \frac{\sqrt{3} \cdot I_i \cdot r_{0i} \cdot l_i \cdot 0,5}{10 \cdot U_n} . \quad (5)$$

$$\Delta U_{BC} = \Delta U_{AD} = \Delta U_{FE} = \frac{\sqrt{3} \cdot I_i \cdot r_{0i} \cdot l_i \cdot 0,5}{10 \cdot U_n} , \%$$

$$\Delta U_{BC} = \Delta U_{AD} = \Delta U_{FE} = \frac{\sqrt{3} \cdot 203 \cdot 0,326 \cdot 0,05}{10 \cdot 0,38} \cdot 0,5 = 0,75\% .$$

Получив значения потерь напряжения на участках электрической сети дома, можно перейти к определению потерь активной мощности $\Delta P = f(\Delta U)$, используя соответствующие коэффициенты $K_{м/н}$

(табл. 1) [5]. При этом следует допустить, что реально измеренные потери напряжения в период зимнего максимума $\Delta U_{изм}$ равны расчетным величинам $\Delta U_{расч}$.

Таблица 1 – Значения $K_{м/н}$ и ΔP

№	Характеристика электрической линии	Значение $K_{м/н}$	Значение $\Delta P\%$
1	Сосредоточенная нагрузка в конце ЛЭП при $x_0=0$ и $\cos\varphi=1$	1	$\Delta P\% = K_{м/н} \cdot \Delta U\%$
2	Сосредоточенная нагрузка в конце ЛЭП при $x_0=0$ и $\cos\varphi \neq 1$	$\frac{1}{\cos^2 \varphi}$	$\Delta P\% = \frac{1}{\cos^2 \varphi} \cdot \Delta U\%$
3	Равномерно распределенная нагрузка при $x_0=0$ и $\cos\varphi=1$	0,67	$\Delta P\% = 0,67 \cdot \Delta U\%$
4	Равномерно распределенная нагрузка при $x_0=0$ и $\cos\varphi \neq 1$	$\frac{0,67}{\cos^2 \varphi}$	$\Delta P\% = \frac{0,67}{\cos^2 \varphi} \cdot \Delta U\%$

Определяем потери мощности ΔP_i по измеренным значениям ΔU_i на участках схемы сети дома по формуле (6) и (7):

– для сосредоточенной нагрузки

$$\Delta P_i = \frac{P_i \cdot \Delta U_i \%}{100}, \quad (6)$$

– для участков с равномерно распределенной нагрузкой

$$\Delta P_i = \frac{P_i \cdot K_{м/н} \cdot \Delta U_i \%}{\cos^2 \varphi \cdot 100}. \quad (7)$$

Для участков со сосредоточенной нагрузкой ΔP_i будут равны:

$$\Delta P_{OA} = \frac{225 \cdot 3,2}{100} = 7,2 \text{ кВт}, \quad \Delta P_{AB} = \Delta P_{AF} = \frac{107 \cdot 0,9}{100} = 0,96 \text{ кВт}.$$

Суммарные потери мощности на участках сети дома со сосредоточенной нагрузкой будут равны:

$$\Delta P_{\Sigma \text{соср}} = 7,2 + 2 \cdot 0,96 = 9,12 \text{ кВт}.$$

Для участков с равномерно распределенной нагрузкой ΔP_i будут равны:

$$\Delta P_{BC} + \Delta P_{AD} + \Delta P_{FE} = 3 \cdot \frac{107 \cdot 0,67 \cdot 0,75}{0,8^2 \cdot 100} = 2,52 \text{ кВт}.$$

Суммарные потери мощности по дому составят:

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{\Sigma \text{соср}} + \Delta P_{\Sigma \text{распр}} = 9,12 + 2,52 = 11,64 \text{ кВт}.$$

Если учесть, что в расчетах принимались удельные расчетные электрические нагрузки для домов 1 и 2 видов по данным ДБН 2003 года [2], то можно предположить, что потери мощности в сетях высотных зданий существенно выросли в несколько раз и проблема их снижения приобретает все большую актуальность.

Оценка реального положения в действующих сетях свидетельствует о неуклонном росте численности городского населения, насыщение быта электроприборами обусловило ежегодный рост электропотребления городов при опережающем росте потребления реактивной мощности, вызванном ростом мелкодвигательной нагрузки, имеющей длительный либо круглосуточный режим работы, оказывая существенное влияние на понижение $\cos\varphi$ до значений от 0,65 до 0,8 [7]. Следует учесть, что $\cos\varphi$ лифтовых установок составляет 0,6 – 0,7.

В статье предлагается метод компенсации реактивной мощности в стояке жилого многоэтажного дома путем определения оптимальной мощности и мест установки конденсаторов. Для чего стояк с равномерно распределенной нагрузкой разделяем на 4 одинаковых участка (по 4 этажа дома). Получаем магистральную линию с глухим подключением нагрузки. Для расчета потерь напряжения нагрузка присоединяется к середине каждого участка.

Оптимальное распределение конденсаторов Q_{K_i} следует проводить в таком порядке: если $Q_K \leq Q_I$ (самой удаленной нагрузке), то всю Q_Σ следует установить в точке 1. Если $Q_{K\Sigma} > Q_I$, то в точке 1 устанавливаем конденсаторы мощностью Q_I , а остаток $Q_{K\Sigma} - Q_I$ распределяется между остальными точками в том же порядке (рис. 4).

На рис. 3 приведена зависимость ΔP от Q_K/Q при установке Q_{K_i} в 1, 2 и более точках [4].

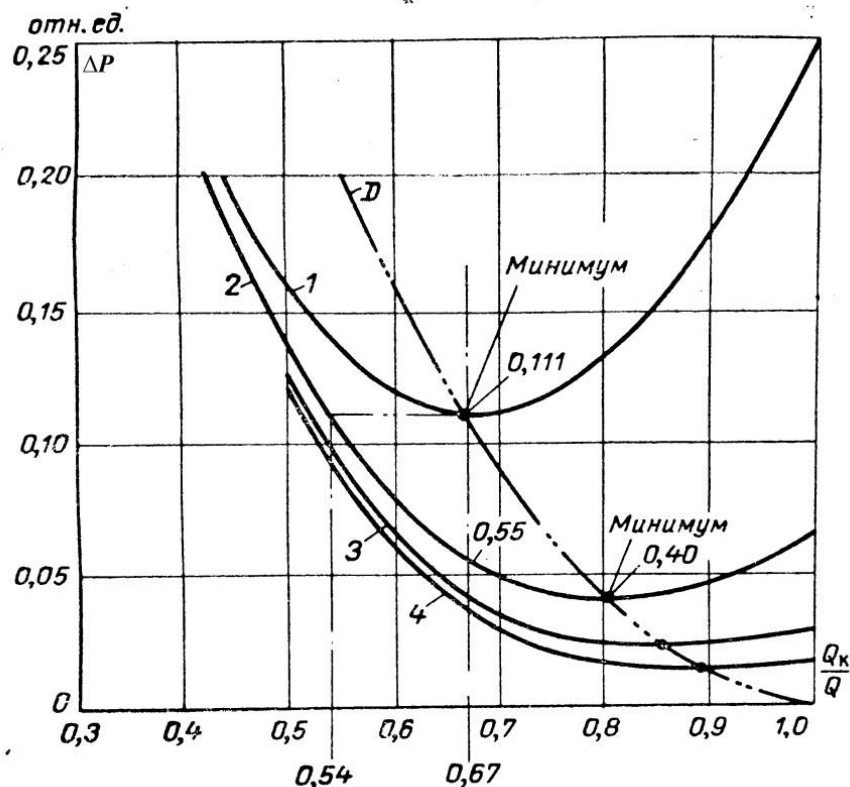


Рисунок 3 – Кривые относительных потерь мощности при различных значениях Q_K/Q при установке в сети батарей конденсаторов

Анализ кривых приводит к следующим выводам: 1. Установка конденсаторов на стояке более чем в двух точках как правило нецелесообразно ввиду незначительной экономии в потерях мощности при переходе двух точек к трем. 2. При установке конденсаторов в одной точке значение Q_K/Q не должно превышать 0,67, а практически 0,6, а в двух точках Q_K/Q должно быть не более 0,7 и снизить относительные потери до 0,055.

Из зависимости, приведенных на рис. 3 определим суммарную мощность батарей конденсаторов и их оптимальное расположение в сети стояка (рис. 4).

$$Q_{K\Sigma} = 0,7 \cdot 80 = 56 \text{ кВАр}$$

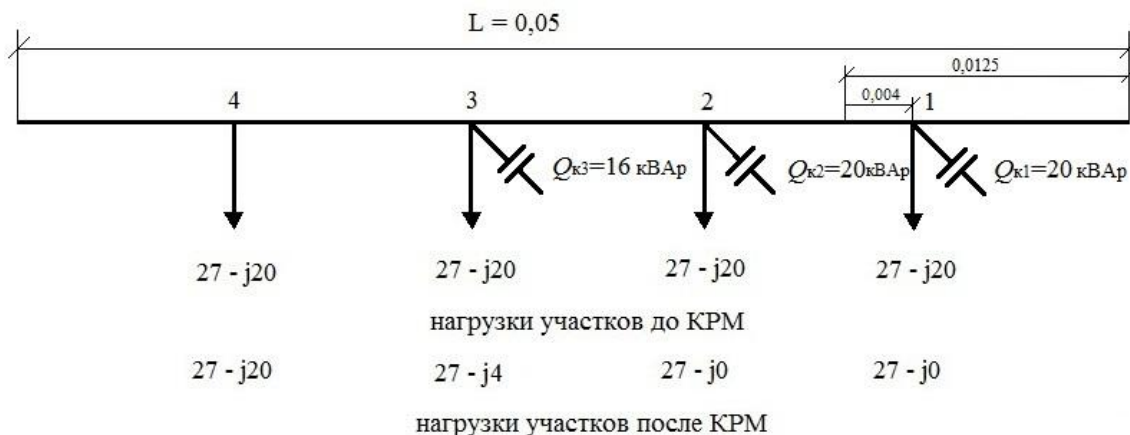


Рисунок 4 – Нагрузка стояков дома до и после КРМ

Определим $\Delta U_i \%$ в стояке дома с равномерно распределенной нагрузкой по формуле (8):

$$\Delta U \%_{\Sigma} = \frac{P \cdot r_0 \cdot l}{10 \cdot U_n^2} \cdot 0,5 \quad (8)$$

$$\Delta U \%_{\Sigma} = \frac{107 \cdot 0,326 \cdot 0,05}{10 \cdot 0,38^2} \cdot 0,5 = 0,6 \%$$

Найдем $\Delta U_i \%$ в магистральной линии, состоящей из четырех участков:

$$1 \quad \Delta U_{12-16} = \frac{27 \cdot 0,326}{1,444} \cdot 0,00625 = 0,038 \%$$

$$2 \quad \Delta U_{8-12} = 0,038 + 2 \cdot 0,038 = 0,114 \%$$

$$3 \quad \Delta U_{4-8} = 0,038 + 4 \cdot 0,038 = 0,19 \%$$

$$4 \quad \Delta U_{0-4} = 0,038 + 6 \cdot 0,038 = 0,266 \%$$

$$\Delta U_{\Sigma} = 0,038 + 0,114 + 0,19 + 0,266 = 0,608 \%$$

Сравним значения суммарных потерь напряжения на стояке дома с равномерно распределенной нагрузкой формула (8) с суммарными потерями напряжения на эквивалентной магистральной линии с 4-мя участками (рис. 4). Как видно из приведенного расчета они оказались одинаковыми ($0,6 \approx 0,608$), то есть магистральная линия является эквивалентной линии с равномерно распределенной нагрузкой. Учитывая, что нагрузки стояков в течении суток переменные, то конденсаторные установки должны быть регулируемые.

Выводы

1. Предложен новый подход решения оптимизационной задачи КРМ в линиях стояков высотных зданий путем эквивалентирования линии с равномерно распределенной нагрузкой в магистральную с глухим подключением нагрузок в центре каждого участка.

2. В эксплуатационной постановке задачи определяется значения $\Delta P_i = f(\Delta U_{изм})$ путем измерения потерь напряжения на каждом участке сети стояка дома, используя коэффициент $K_{м/н}$ (табл. 1).

3. Дальнейшее уменьшение трудозатрат проведения измерений может быть достигнуто путем использования метода случайной выборки, когда измерения проводятся не во всех сетях домов, а только в их части.

4. Чтобы получить ощутимый эффект от КРМ в сетях стояков, следует обследовать больший объем

жилых зданий.

Список использованной литературы

1. Железко Ю. С. Выбор мероприятий по снижению потерь электроэнергии в электрических сетях. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 176 с.
2. ДБН В.2.5-23:2003. Проектування електрообладнання об'єктів цивільного призначення. – К.: Мінрегіонрозвитку та будівництва України, 2003. – 131 с.
3. Зорин В. В., Тисленко В. В. Системы электроснабжения общего назначения. – Ч.: ЧГТУ, 2005. – 340 с.
4. Гительсон С. М. Экономические решения при проектировании электроснабжения промышленных предприятий. – М.: Энергия, 1971. – 256 с.
5. Зорин В. В., Докийчук Н. А., Буйный Р. А., Перепеченый В. А. Модели и методы определения потерь мощности и электроэнергии в сетях 0,38 кВ высотных зданий при проектировании и эксплуатации // *ЭНЕРГЕТИКА: економіка, технології, екологія*, №1, 2017. – с. 7-13
6. Лазуренко А. П., Прохоренко Ю. В. Современные методы и устройства компенсации реактивной мощности в бытовых системах электропотребления. – Х.: НТУ "ХПИ", 2011. – № 41–с. 83-87.
7. Говоров Ф. П., Перепеченный В. А., Говоров В. Ф., К вопросу о компенсации реактивной мощности в системах электроснабжения городов // *Енергетика та електрифікація*. – 2007. – №7 – с. 54-58

V. Zorin, Dr. Eng. Sc., Prof.; ORCID 0000-0001-5913-401X

Y. Matskevych, Msc., ORCID 0000-0002-1095-3791,

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

COMPENSATION OF REACTIVE POWER IN THE STANDS HEIGHT BUILDINGS

A method has been developed for determining the locations of installation and power of capacitor banks based on the data of voltage loss measurements at the typical sections of the electric network scheme. An algorithm for calculating such parameters of the regime as the loss of active power ΔP and reactive power ΔQ in the 0.38 kV electric network of high-rise buildings of the city is given. To simplify the calculations, the article takes into account the correlation between the loss of voltage in the electrical network and the loss of power in the elements of the electrical network using the known method $K_{\text{мн}}$. This will greatly simplify the calculations of the losses of active power. Using the values of the power losses from the measured voltage losses during the winter maximum at certain typical sections of the network, the accuracy of the loss calculation can be increased. An example of calculation for a multi-storey house by this method is considered. Advantages of the proposed method for determining the locations and power of capacitor banks are simplicity and the ability to compensate for reactive power directly from domestic consumers.

Keywords: calculation scheme, the parameters of the mode, compensation of reactive power, capacitor banks, power loss, voltage loss.

References

1. Zhelezko Yu.S. Choice of measures to reduce energy losses in electric networks. – М.: Energoatomizdat, 1989. –176p. (Rus.)
2. DBN V.2.5-23:2003. Design of electrical facilities for civil use. – К.: Ministry of Regional Development and Construction of Ukraine, 2003. – 131 p. (Ukr.)
3. Zorin V.V., Tislenko V.V. General Electric Power Supply Systems. – Ch.: ChSTU, 2005. – 340 p. (Rus.)
4. Gitelson S.M. Economic solutions in the design of power supply to industrial enterprises. – М.: Energy, 1971. – 256 p. (Rus.)
5. Zorin V.V., Dokiychuk N. A., Buinyi R.A., Perepechenyi V.A. Models and methods to determine the loss of power and electricity in 0.38 kV urban electric networks in projected and operated high-rise buildings. // *POWER ENGINEERING: Economics, Technique, Ecology*. – 2017. – №1. – p. 7-13 (Rus.)
6. Lazurenko A. P., Prokhorenko Yu. V. Modern methods and devices for reactive power compensation in household power consumption systems. – Kh.: NTU "KhPI", 2011. – № 41 – p. 83-87 (Rus.)
7. Govorov F. P., Perepechenny V. A., Govorov V. F. On the issue of compensation of reactive power in urban power supply systems // *Power engineering and electrification*. – 2007. – № 7 – p. 54-58 (Rus.)

УДК 621.311.01

В. В. Зорін, д-р техн. наук, проф.; ORCID 0000-0001-5913-401X
Ю. М. Мацкевич, магістр, ORCID 0000-0002-1095-3791,

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
КОМПЕНСАЦІЯ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ У СТОЯКАХ ВИСОТНИХ БУДІВЕЛЬ

Розроблено метод визначення місць установки і потужності батарей конденсаторів на основі даних вимірювань втрат напруги на характерних ділянках схеми електричної мережі. Наведено алгоритм розрахунку таких параметрів режиму, як втрати активної потужності ΔP і реактивної потужності ΔQ в електричній мережі 0,38 кВ будинків висотної забудови міста. Розглянуто приклад розрахунку для багатопверхового будинку даним методом. Переваги запропонованого методу визначення місць установки і потужності батарей конденсаторів це простота і можливість компенсувати реактивну потужність безпосередньо у побутових споживачів.

Ключові слова: розрахункова схема, параметри режимів, компенсація реактивної потужності, конденсаторні батареї, втрати потужності, втрати напруги.

Надійшла 25.01.2018

Received 25.01.2018

УДК 697.112.2

Р.В. Мордас, магістрант
Л.Н.Лебедь, к.т.н., доцент

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

МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОВОГО СТАНУ БУДІВЛІ З СИСТЕМОЮ ТЕРМОАКТИВНОГО УТЕПЛЕННЯ

В статті описано нову систему теплозабезпечення, що може використовуватися як для нових будинків, так і для реконструкції старих будівель, де система опалення вже вичерпала свій ресурс і не підлягає відновленню. Розглянуто систему термоактивного утеплення опалення та охолодження, основними перевагами якої є робота з низькотемпературними джерелами теплоти (телові насоси, сонячні колектори та ін.) Запропоновано теплогідравлічну схему роботи даної системи в поєднанні з інноваційним обладнанням. Проведено CFD моделювання температурного режиму поточної частини корпусу теплоенергетичного факультету КПІ ім. Ігоря Сікорського. Отримано температурні поля та розподіли швидкості повітря в приміщенні, витрати теплової енергії для опалення приміщення в двох випадках: до термомодернізації та після її виконання. У зв'язку із збільшеною ефективністю роботи теплових насосів в низькотемпературному режимі маємо різницю у витраті енергії на підтримання температурного стану будівлі в 8 разів. Характерною особливістю даної системи також є можливість роботи в режимі кондиціонування приміщень.

Ключові слова: термоактивні конструкції, термоактивне утеплення, система теплозабезпечення, температурний стан будівель, тепловий насос.

© Р.В. Мордас, Л.Н.Лебедь, 2018

Вступ. В контексті постійного підвищення цін на енергоресурси постає питання найефективнішого використання останніх. При цьому, витрати на підтримання оптимального температурного рівня об'єктів зростають. Аналіз втрат енергії первинного палива свідчить про те, що найбільші надлишкові втрати теплоти відбуваються у її кінцевих споживачів, тобто в будівлях. Тому постають задачі організації енергозберігаючих режимів експлуатації будівлі, пошуку і реалізації інноваційних рішень щодо зменшення тепловтрат (теплопритоків) та приведенню їх до відповідності діючим нормам. Відомі термоактивні будівельні системи (TABS), де елементи, які гріють, розташовані безпосередньо в бетонних елементах будівлі (зовнішні стіни, стеля, перекриття) [1]. Тобто система TABS актуальна лише для нових будівель, що проектуються. Для термомодернізації існуючих будівель цю систему застосовувати неможливо. Тому пропонується застосовувати систему термоактивного утеплення, яка монтується на фасаді вже існуючої будівлі.

Актуальність. Важливим питанням зменшення споживання енергії є енергоефективність будівель. Аналіз існуючої літератури показав, що системи з використанням термоактивних конструкцій є оптимальним рішенням при модернізації існуючих старих будівель до рівня енергопасивних категорій, а також при заміні систем опалення, які вичерпали свій ресурс. Оскільки система активного утеплення-опалення охолодження компенсує тепловтрати, то необхідно оцінити температурний стан приміщень при застосуванні даних систем. Результатам рішення цієї задачі з використанням програми EnergyPlus в комплексі з DesignBuilder присвячена дана стаття.

Система теплозабезпечення будівлі. Представлена система (рис.1, 2) є оптимальним рішенням для реконструкції застарілих систем опалення, оскільки немає необхідності замінювати старі системи на нові, це досить актуально для багатоповерхівок, які були збудовані (40...50) років тому. При цьому, вирішується декілька важливих питань:

- 1) збільшення опору теплопередачі огорожуючих конструкцій;
- 2) приведення будівель до існуючих норм енергоефективності;
- 3) забезпечення низького рівня вологості конструктивних елементів та утеплювача;
- 4) рівномірність розподілення теплового навантаження по будівлі (без зон перегріву);
- 5) нормований вологісний стан приміщень за рахунок відсутності ефекту значної дифузії вологи через огорожуючі конструкції, що дають стандартні системи обігріву; це покращує теплоізоляційні властивості утеплювача та конструктивних матеріалів та не допускає утворення грибків;
- 6) підвищується теплова інерційність будівлі, що дозволяє застосовувати будинок як тепловий акумулятор для роботи системи за зниженим нічним тарифом;
- 7) забезпечується опалення та кондиціонування приміщення за рахунок того, що контури, які гріють, розташовуються ззовні, також виключено утворення конденсату на межі утеплювач-стінка.[2]

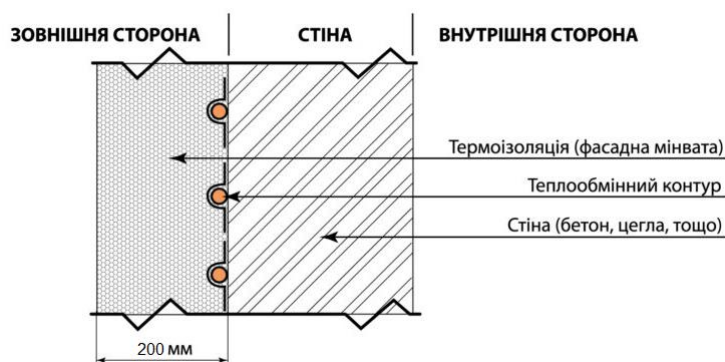


Рисунок 1 - Поперечний перетин стіни з системою термоактивного утеплення [2]

На рисунку 3 зображено теплогідралічну схему системи термоактивного утеплення, яка складається з теплового насоса, буферного акумулятора теплоти, низькопотенційного джерела теплоти та вузла реверсу. Дана схема реалізує опалення та кондиціонування будівлі з використанням низькопотенційних джерел теплоти, Сонця. Для сталої роботи теплового насоса передбачено застосування буферного акумулятора тепла, що також дозволяє використовувати знижений нічний тариф на електроенергію. Сонячні колектори дозволяють підвищити ефективність

роботи теплового насоса за рахунок роботи на низькопотенційне джерело (в міжсезонний період), а також здійснювати прямий підігрів буферного акумулятора (в період високого показнику сонячної інсоляції).

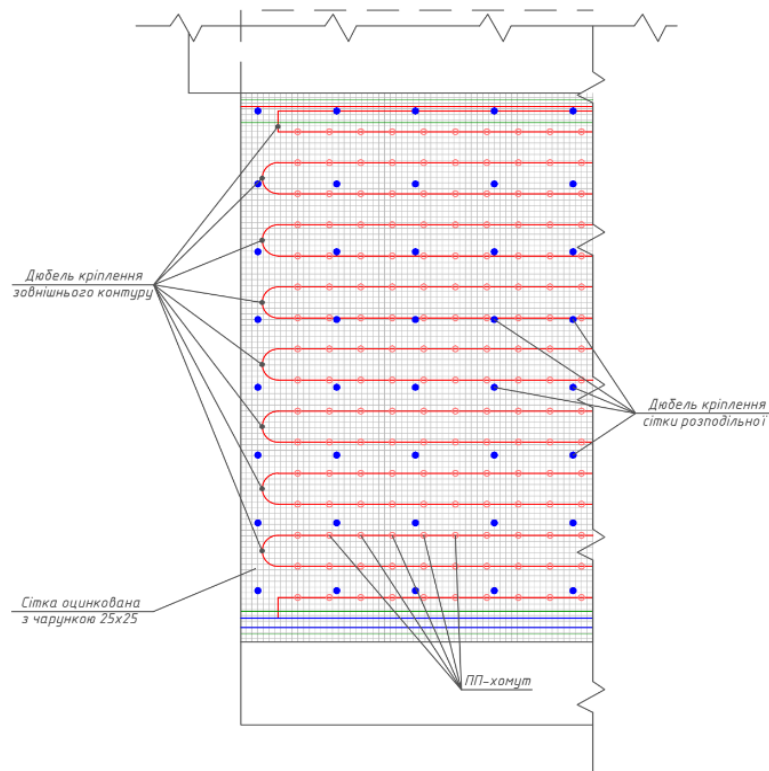


Рисунок 2 – Загальний вид системи термоактивного утеплення

У випадку застосування теплового насосу типу ґрунт-вода, існує можливість використання так званого «пасивного» холоду землі, тобто отримувати теплоносії з температурою 10 °С протягом певного періоду року. Що повністю є достатнім для ефективної роботи системи термоактивного утеплення в режимі охолодження.

Якщо ж в якості низькопотенційного джерела енергії використовується повітря, то можливість використання «пасивного» холоду відсутня, ефективність кондиціонування за допомогою теплового насосу зберігається на високому рівні за рахунок невеликого перепаду (10...15 °С) між температурами на випарнику та конденсаторі теплового насосу. При цьому, холодильний коефіцієнт теплового насосу EER (Energy Efficiency Ratio) має значення 6...7 на відміну від застосування звичайної системи кондиціонування, де цей показник не перевищує в середньому 3,5.

Представлена система термоактивного утеплення з альтернативними джерелами теплоти (рис. 3) передбачає відокремлення контурів, які гріють, по різних фасадах будівель. Це дозволяє змінювати температурний напір контуру в залежності від орієнтації по сторонам світу, тобто збільшити тепловий потік з північної сторони, та зменшити його за необхідності з боку можливої сонячної інсоляції (південний фасад).

При виборі методу укладання трубопроводів надають перевагу схемі руху за Тихельманом, використовуючи її основну перевагу – однакову витрату теплоносія в кожному контурі системи. Це дозволяє уникнути значних градієнтів температур, особливо коли застосовується реверсивна схема циркуляції з певним гістерезисом переключення, час якого для кожної будівлі визначається експериментальним шляхом.

Використання даної системи дозволяє досягти значення коефіцієнта тепловіддачі від огорожуючих конструкцій в діапазоні (5...9) Вт/(м²·°С), тому доцільно застосовувати систему в будівлях із відсотком скління, що менше 50%.

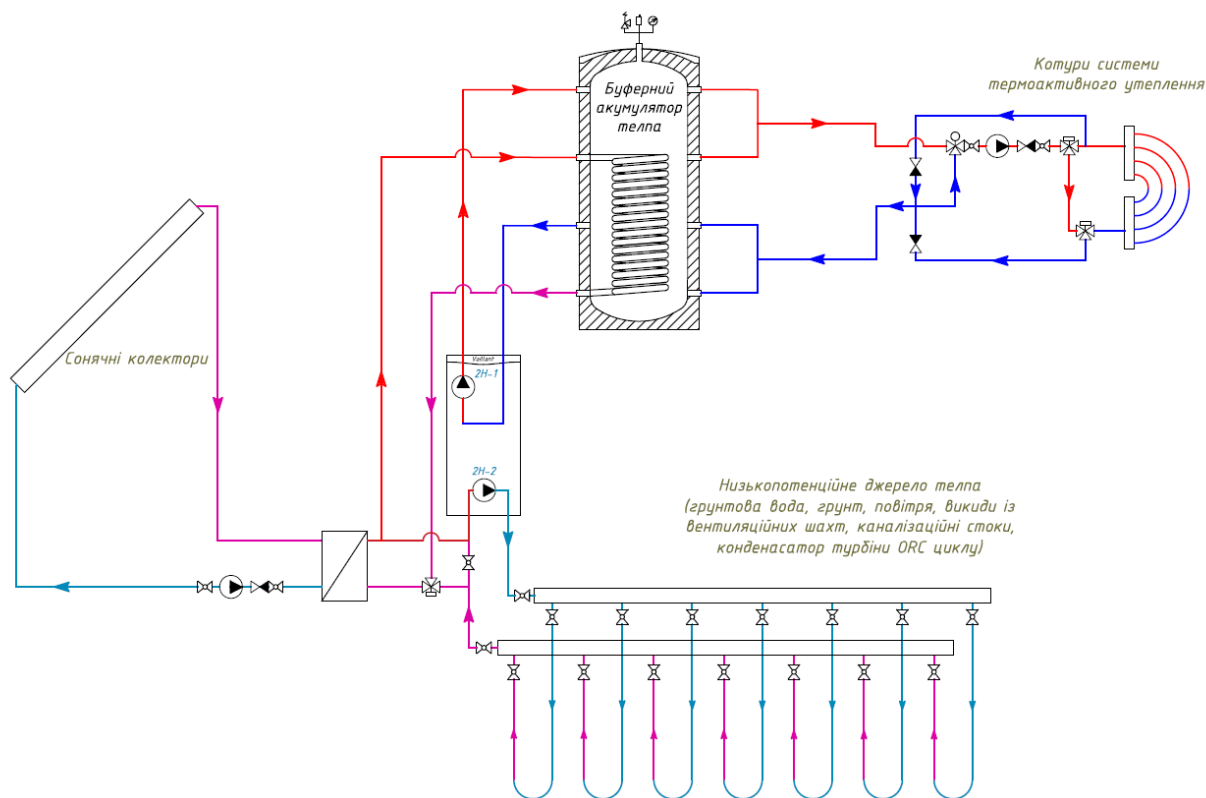


Рисунок 3 - Теплогідравлічна схема системи термоактивного утеплення із застосуванням альтернативних джерел теплоти

Вибір методу дослідження. Для отримання температурного стану будівлі було обрано чисельний метод дослідження, який дозволяє врахувати велику кількість факторів впливу на температурний стан, якісно показати цей вплив для виконання подальшого аналізу процесів і розробки ефективних систем термостабілізації. Перевагами чисельного методу є низька вартість, відносна швидкість, повнота інформації, можливість математичного моделювання реальних процесів.

Опис об'єкту, що моделюється.

У якості об'єкту моделювання було прийнято частину корпусу № 5 (поточні аудиторії) Теплоенергетичного факультету «КПІ ім. Ігоря Сікорського». Конструктив будівлі складався з цементно-піщаної кладки в 200 мм, що ззовні покрита шаром цементно-піщаної штукатурки товщиною 30 мм. З внутрішньої сторони будівлі – гіпсова штукатурка.

Для створення системи термоактивного утеплення додається шар утеплювача з фасадних мінеральних плит товщиною в 200 мм.

На рисунку 3 зображено геометричну модель частини будівлі, що була об'єктом дослідження. Для побудови геометричної моделі об'єкту використовувалися кресленники будівлі.



Рисунок 3 – Геометрична модель об'єкту моделювання

В таблицях 1...3 представлено розрахункові дані щодо даного типу будівлі, які обрано згідно креслеників будівлі і вимог державних будівельних норм [3].

Таблиця 1 – Розрахункові параметри об'єкту моделювання

Параметр	Значення
Загальна площа	2061,3 м ²
Об'єм	11800 м ³
Щільність людей	0,2 людини/м ²
Людська активність (коефіцієнт 1,0 для чоловіків; 0,85 для жінок)	123 Вт/людину
Тепловтрати частини корпусу із стандартною системою опалення	280,37 кВт
Тепловтрати частини корпусу із застосуванням системи, що пропонується (значення зменшується за рахунок застосування утеплювача)	212,21 кВт

Таблиця 2 – Розрахункові параметри температурного режиму будівлі [3]

Розрахункова температура	Номінальна (підвищена оптимальна), °С	В період відсутності людей, °С
Нагріву	21	12
Охолодження	24	28

Таблиця 3 – Прогнозована ефективність роботи системи термоактивного утеплення

Сезонна ефективність роботи системи	Стандартної (ККД)	Що пропонується (COP)
Нагріву	0,65	7
Охолодження	-	6

Результати дослідження. Для дослідження температурного стану будівлі із застосуванням системи термоактивного утеплення було використано програмний модуль EnergyPlus із інтерфейсом DesignBuilder. Задавалися постійні граничні умови другого роду на поверхнях:

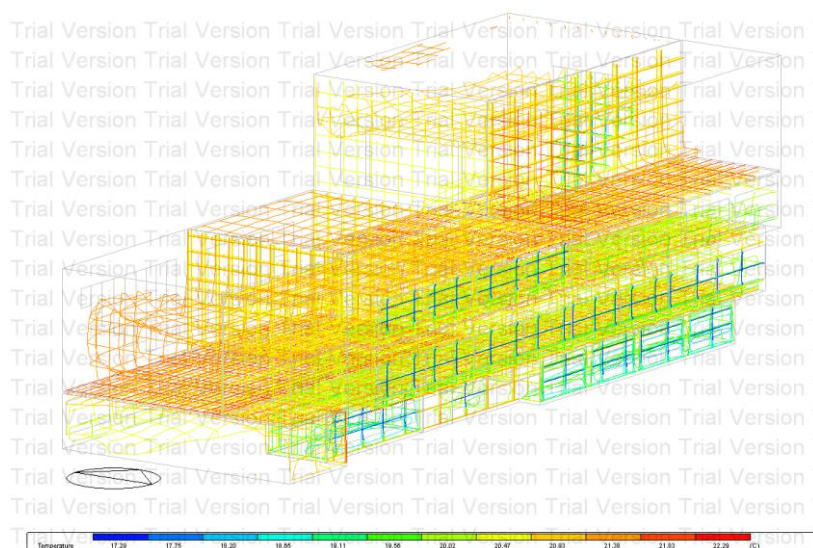
- температура внутрішніх стін +23 °С;
- температура світлопрозорих огорожуючих конструкцій +5 °С.
- температура зовнішньої поверхні перекриття дорівнює температурі зовнішнього середовища.

– температура підлоги на ґрунті в межах +10...+15 °С.

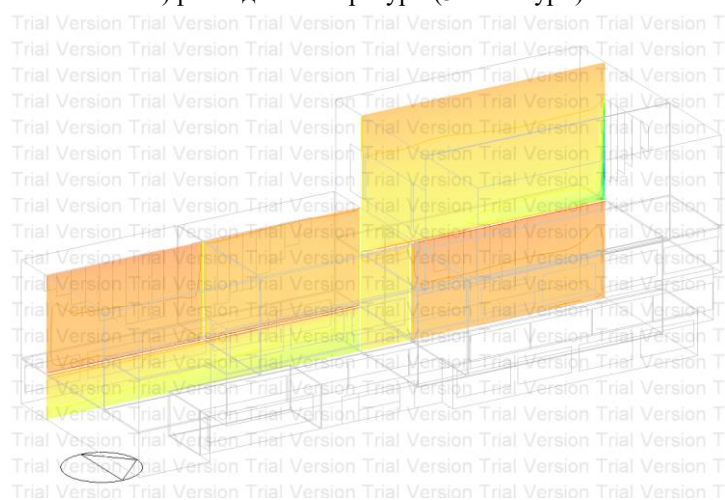
На рисунку 4 представлено результати CFD моделювання у вигляді розподілу температури всередині об'єкту дослідження (поточна частина корпусу) при застосуванні системи термоактивного утеплення.

Аналіз представлених даних на рис. 4 показує, що найнижча температура повітря спостерігається в межах світлопрозорих огорожуючих конструкцій. Також варто зазначити, що температура в межах вікон (0,3...0,4 м) від габаритного розміру вікна дещо знижується (16...18 °С). Температура внутрішньої поверхні стіни становить близько 23 °С. При цьому, середньоінтегральна температура в приміщеннях з постійним перебуванням людей підтримується в допустимих межах 20°С. В приміщеннях із тимчасовим перебуванням людей (коридори, хол) температура має значення в 17,35 °С, що є припустимими значеннями згідно з діючими нормами [3].

Аналіз даних по розподілу швидкості в приміщеннях корпусу, які представлені на рис.5 показав, що зони локального збільшення швидкості потоку повітря розташовані поряд з світлопрозорими огорожуючими конструкціями, які мають найменший термічний опір та відповідно температуру. Стіни з північного фасаду будівлі також мають зони із збільшеною швидкістю повітря, тому для компенсації підвищених тепловтрат на даних фасадах, необхідно збільшувати температурний напір у відповідних контурах системи.



а) розподіл температури (3D контури)



б) розподіл температури в перетині

Рисунок 4 – Розподіл температури повітря в об'єкті дослідження

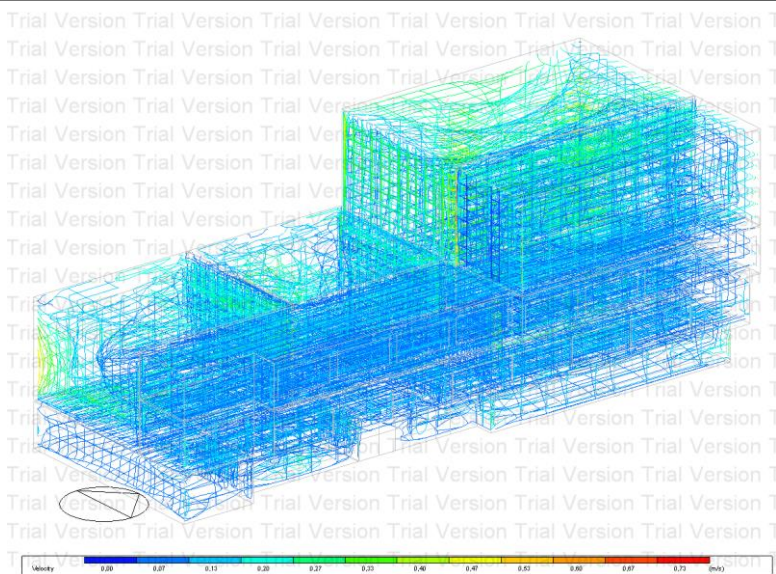


Рисунок 5 – Розподіл швидкості повітря в об’єкті дослідження

На рис. 6 представлено розподіл навантаження системи опалення об’єкту дослідження протягом всього 2016 року. Результати отримано на підставі даних про погодні умови з кроком в 1 день, що надані World Meteorological Organization (Всесвітня метеорологічна організація) [4]. Середньорічні витрати енергії на опалення складають близько 30000 кВт-год, а локальні екстремуми навантаження пов’язані з гнучкістю системи та передбаченим зменшенням теплового навантаження системи в період відсутності людей у приміщеннях.

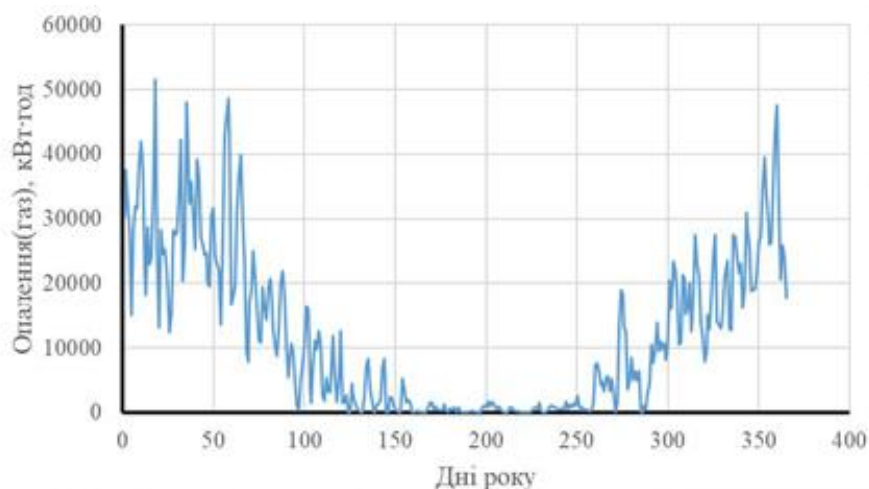


Рисунок 6 – Розподіл витрати теплової енергії протягом 2016 року при використанні стандартної системи опалення

На рис.7 показано розподіл навантаження системи опалення об’єкту дослідження протягом 2016 року при застосуванні системи термоактивного утеплення. Як показує аналіз отриманих даних середньорічні витрати енергії на опалення в цьому випадку складають близько 3500 кВт-год. Таким чином, витрати приведеної енергії на опалення приміщень об’єкту фактично зменшуються у 8 разів. Тобто фактично теплоспоживання будівлі не зменшується у 8 разів, оскільки тепловий насос генерує теплову енергію із значно вищим COP (6.5...7), його електрична потужність при цьому нижче, ніж для звичайних умов експлуатації. Це пов’язано також із використанням низькотемпературної системи опалення з тепловим насосом. Оскільки тепла потужність, що генерує тепловий насос, залежить від різниці температур між конденсатором та випарником, електрична потужність для даної системи складає 25 кВт (за стандартних значень COP B0/W35 4.7 згідно з EN14511 [5] можна покрити лише 100 кВт навантаження).

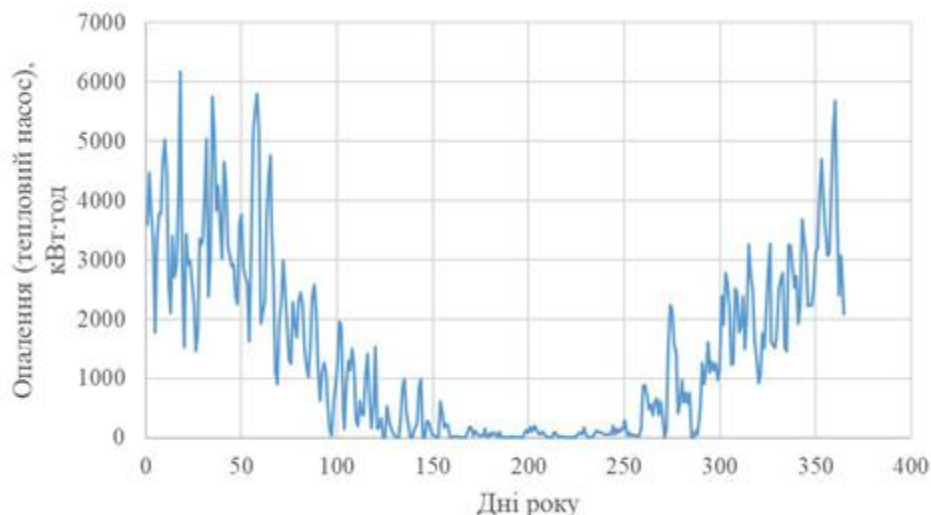


Рисунок 7 – Розподіл витрати енергії на опалення протягом 2016 року при використанні системи термоактивного утеплення

На рис.8 представлено зміну навантаження системи кондиціонування протягом дня 15 липня 2016 року, так як в цей день згідно даним, які надані World Meteorological Organization [4], спостерігалась максимальна температура повітря. Пікове значення сягає 160 кВт потужності в момент пуску системи. При виході системи на номінальний режим роботи спостерігається спад навантаження, що пов'язано із залежністю від погодних умов конкретного регіону [4]. При розрахунку буферні акумулятори не враховувались, оскільки їх завдання – максимально зсунути час генерації теплоти в нічний період, коли електроенергія дешевша.

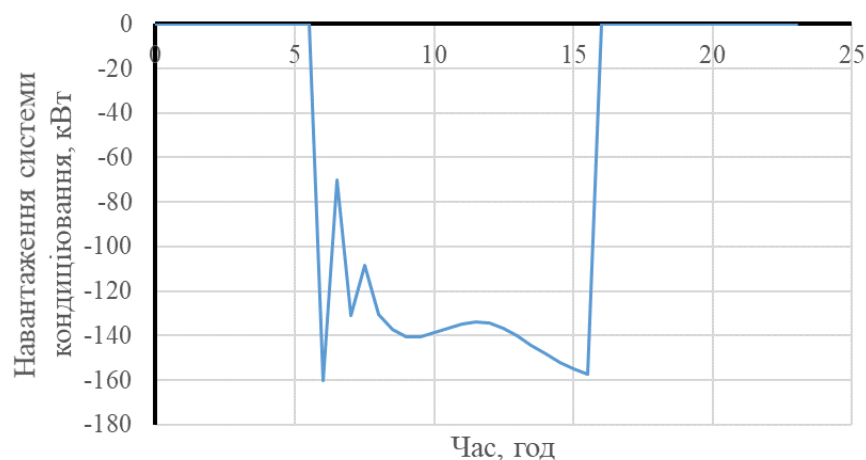


Рисунок 8 – Розподіл навантаження системи кондиціонування при використанні системи термоактивного утеплення протягом дня (15 липня 2016 року)

Висновки.

1. Описано схемне рішення роботи системи термоактивного утеплення із застосуванням теплового акумулятора та роботи системи в нічний час за зниженим тарифом в комплексі із тепловим насосом типу сольовий розчин-вода.

2. Для запропонованої системи термоактивного утеплення використовуючи програмний модуль EnergyPlus із інтерфейсом DesignBuilder отримано розподіл температур і швидкостей в будівлі. В середньому температура в приміщеннях з постійним перебуванням людей складає 20 °С. У приміщеннях із тимчасовим перебуванням людей значення температури сягає 17 °С.

3. Визначені витрати енергії на опалення для двох систем (стандартної та запропонованої), в результаті показано, що система термоактивного утеплення у 8 разів менше споживає енергії в порівнянні зі стандартною системою.

4. Отримано максимальне навантаження системи кондиціонування (160 кВт), в перерахунку на встановлену електричну потужність теплового насосу, що працює в режимі активного холоду при застосуванні системи активного утеплення вона сягатиме 26,7 кВт.

Таким чином, представлена система термоактивного утеплення є оптимальним рішенням для реконструкції систем опалення, що вичерпали свій ресурс, оскільки не потребує втручання в «життєдіяльність» будівлі і забезпечує комфортні умови в приміщенні протягом всього року, при цьому ефективно використовує енергоресурси.

Список використаної літератури

1. Gregor P. Henze, Primary energy and comfort performance of ventilation assisted thermo-active building systems in continental climates / Gregor P. Henze, Clemens Felsmann, Doreen E. Kalz, Sebastian Herkel // *Energy and Buildings* 40, 2008, p.p. 99–111.
2. Екокольт [Електронний ресурс] <http://ecocolt.com/>
3. ДБН В.2.5-67:2013 Опалення, вентиляція та кондиціонування. Київ, 2013, 147 с.
4. The World Meteorological Organization [Електронний ресурс] <https://public.wmo.int/>
5. BS EN 14511-2:2013 - Air conditioners, liquid chilling packages and heat pumps with electrically driven compressors for space heating and cooling. Test conditions.

R. Mordas, Masters

N. Lebed, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof.

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

MODELING OF THE HEAT CONDITION OF THE BUILDING WITH THE SYSTEM OF THERMO-ACTIVE INSULATION

The article describes a new heating system that is ideal for new buildings and for the reconstruction of old buildings, where the heating system has already exhausted its resource and can not be restored. The system of thermal-active insulation of heating and cooling has been reviewed, the main advantages of which are work with low-temperature heat sources (heat pumps, solar collectors, etc.). The thermal-hydraulic circuit of this system in conjunction with innovative equipment is proposed. CFD simulation of the temperature mode of the part of the building of the Heat Power Department of Igor Sikorsky KPI. Temperature fields and air speed distribution indoors are obtained, heat energy expenditure are obtained for two cases: before thermo-modernization and after its implementation. Due to the increased efficiency of heat pumps in the low-temperature mode, we have a difference in energy consumption to maintain the temperature of the building 8 times. Also this system can work as air conditioning for buildings.

Key words: thermos-active constructions, thermos-active insulation, heat supply system, thermal condition of buildings, heat pump.

References

1. P. Gregor Henze, Clemens Felsmann, Doreen E. Kalz, Sebastian Herkel "Primary energy and comfort performance of ventilation assisted thermo-active building systems in continental climates" *Energy and Buildings* vol. 40, pp. 99–111, 2008.
2. Ecocolt [Online] <http://ecocolt.com/>
3. DBN V.2.5-67: 2013 Heating, ventilation and air conditioning. Kyiv, 2013, p. 147.
4. The World Meteorological Organization [Online] <https://public.wmo.int/>
5. BS EN 14511-2:2013 - Air conditioners, liquid chilling packages and heat pumps with electrically driven compressors for space heating and cooling. Test conditions.

Р.В. Мордас, магістрант
Л.Н.Лебедь, к.т.н., доцент

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»
**МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ ЗДАНИЯ С СИСТЕМОЙ
ТЕРМОАКТИВНОГО УТЕПЛЕНИЯ**

В статье описано новую систему теплоснабжения, которая может использоваться как для новых домов, так и для реконструкции старых зданий, где система отопления уже исчерпала свой ресурс и не подлежит восстановлению. Рассмотрено систему термоактивного утепления отопления и охлаждения, основными преимуществами которой является работа с низкотемпературными источниками теплоты (тепловые насосы, солнечные коллекторы и др.) Предложено теплогидравлическую схему работы данной системы в сочетании с инновационным оборудования. Проведено CFD моделирование температурного режима части корпуса теплоэнергетического факультета КПИ им. Игоря Сикорского.. Получены температурные поля и распределения скорости воздуха в помещении, расходы тепловой энергии для отопления помещений в двух случаях: до термомодернизации и после ее выполнения. В связи с возросшей эффективностью работы тепловых насосов в низкотемпературном режиме имеем разницу в расходе энергии на поддержание температурного состояния здания в 8 раз. Характерной особенностью данной системы также является возможность работы в режиме кондиционирования помещений.

Ключевые слова: термоактивные конструкции, термоактивное утепление, система теплоснабжения, температурное состояние зданий, тепловой насос.

Надійшла 15.03.2018

Надійшла 15.03.2018

УДК 622.276

Л.К. Лістовщик, канд. техн. наук, доц., ORCID 0000-0003-3413-1802

О.В. Лотонова, студентка.

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

**ЕНЕРГООЩАДНА СИСТЕМА ЗАПОБІГАННЯ ПРОЦЕСУ
ВІДКЛАДЕННЯ ПАРАФІНІВ НА СТІНКАХ НАФТОВОЇ
СВЕРДЛОВИНИ**

Представлено результати аналітичних досліджень системи обігріву труби НКТ з метою запобігання відкладення парафінів на її стінках з використанням як електрокабелю, так і нагрітого контуру теплового насосу. Проведено аналіз результатів та вибрано спосіб нагріву труб з використанням теплового насосу.

Доведено, що при використанні теплового насосу для нагрівання труби, порівняно з використанням електрокабелю, відбувається значне скорочення енерговитрат і грошових витрат на придбання електроенергії.

Ключові слова: нафтова свердловина, тепловий насос, парафінова пробка, кабель для нагріву

Вступ. Розвиток нафтогазової промисловості в Україні потребує підвищення ефективності методів розробки родовищ і збільшення нафтовиддачі пластів. Важлива роль у вирішенні цієї задачі відводиться новітнім дослідженням в області нафтовидобутку і використання науково-дослідних розробок в процесах підвищення нафтовиддачі.

В процесі руху нафти від пласта до поверхні, наприклад, при фонтанній експлуатації, або експлуатації свердловини насосними установками, температура порід навколо свердловини зменшується, а отже, температура нафти теж зменшується і стає нижчою за температуру плавлення парафіну, який є присутнім в нафті. Парафін починає осідати на холодних стінках свердловини, утворюючи так звану парафінову пробку, яка спочатку зменшує прохідний отвір для руху рідини, а згодом зовсім перекриває її рух і стопорить штанги при експлуатації свердловини штанговою свердловинною насосною установкою (ШСНУ) [1].

У наведеній статті висвітлено два способи запобігання процесу відкладення парафінів на стінках нафтової свердловини з використанням електрокабелю та теплового насоса, наведені результати аналітичних досліджень основних параметрів.

Метою роботи є аналітичне обґрунтування основних параметрів енергоощадної системи запобігання процесу відкладення парафінів на стінках нафтової свердловини.

Постановка задачі Для досягнення мети необхідно аналітично визначити основні параметри процесу нагріву труби НКТ за допомогою електрокабелю та теплового насоса, порівняти способи, обґрунтувати вибір раціонального енергоощадного способу нагріву.

Матеріали і результати досліджень

Існує багато способів запобігання відкладенню парафінів на елементах конструкції свердловини. Це механічний спосіб, використання водяного пару, хімічні методи та ін. [2].

Найбільш близьким технічним рішенням до запропонованого в статті є використання для підігріву труб електрокабеля, який нагрівається за допомогою струму, який протікає в ньому [3], тому є доцільним порівняти запропоновану систему саме з цим методом.

Запропонована система запобігання процесу відкладення парафіну на стінках нафтової свердловини вирішує поставлену задачу використанням теплового насоса в якому вхідний контур з'єднаний з вихідними трубами теплообмінника, який відбирає тепло від рідини, що циркулює в допоміжній свердловині, а вихідний контур теплового насоса у вигляді гнучкої труби навитий на насосно-компресорну трубу (НКТ) свердловини, яка експлуатується, при цьому циркуляція рідини у трубі відбувається за допомогою циркуляційного насоса [4].

Це технічне рішення дозволяє запобігти процесу відкладення парафіну на стінках свердловини завдяки підігріву стінок свердловини відібраним теплом від іншої свердловини за допомогою теплового насоса до температури, яка перевищує температуру плавлення парафіну.

Система запобігання процесу відкладення парафіну на стінках нафтової свердловини (рис. 1) містить тепловий насос 1 з вихідним трубопроводом 2, який розташований в стовбурі діючої свердловини 3 та вхідним трубопроводом 4, який з насосом 5 з'єднаний з вихідними трубами теплообмінника 6, що відбирає тепло від рідини, яка циркулює в допоміжній свердловині 7 за допомогою насоса 8. Вихідний контур 2 теплового насоса у вигляді гнучкої труби навитий на трубу НКТ свердловини, яка експлуатується, при цьому циркуляція рідини у трубі відбувається за допомогою насоса 9.

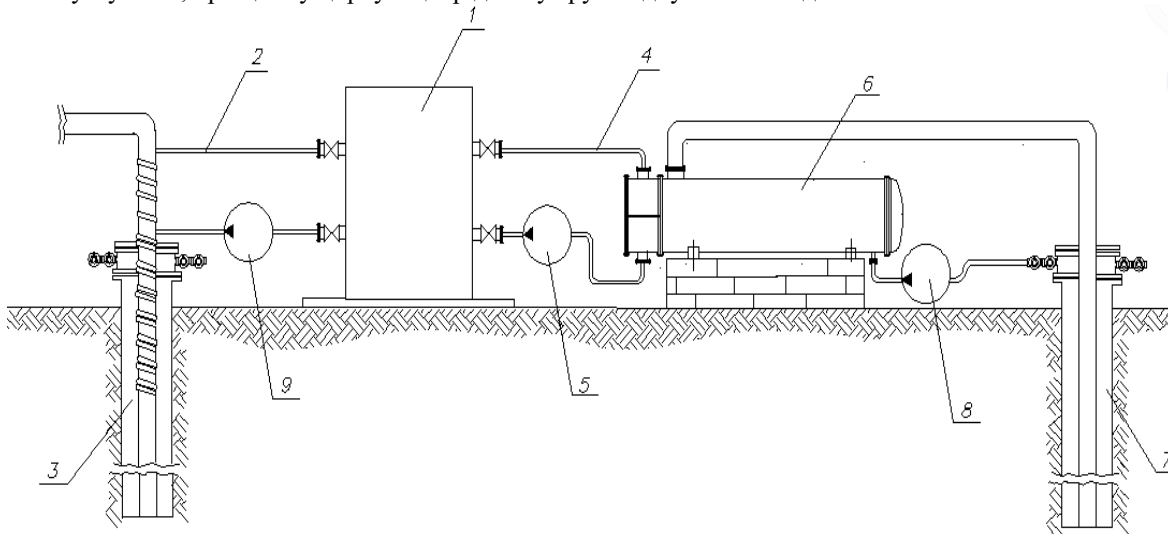


Рисунок 1 – Система запобігання процесу відкладення парафінів на стінках нафтової свердловини

Принцип роботи системи. Рідина, яка циркулює в допоміжній свердловині, за допомогою насоса 8 перекачується по трубопроводу до вхідного контуру теплообмінника 6. Теплообмінник відбирає тепло. За допомогою насоса 5 рідина перекачується на вхід теплового насоса 1 по трубопроводу 4. У вихідному контурі теплового насоса теплоносія нагрітий до 75 °С, а контур навитий на трубу НКТ свердловини, яка експлуатується 3, по якій високопарафініста нафта надходить на поверхню. Рідина, яка потрапляє у вихідний трубопровід 2 теплового насоса обігриває трубу НКТ свердловини, тим самим запобігаючи процесу відкладення парафіну на її стінках. Циркуляція рідини у витках відбувається за допомогою насоса 9.

Підігріта нафта надходить із свердловини в ємності, які знаходяться на поверхні, де і осідає парафін. Очистка таких ємностей від парафінів не становить великої проблеми.

За методикою, яка описана в [5] розраховано та вибрано з ряду типових теплообмінників оптимальний з точки зору ефективності теплопередачі, в якому 100000 кг/год. нафти змінює свою температуру з $t_{1н}$ до 70 °С за рахунок теплообміну з 90000 кг/год. води, що має початкову температуру 20 °С і кінцеву температуру 60 °С. Теплоємність нафти $c_1=2,72$ кДж/кг·К, теплоємність води $c_2=4,218$ кДж/кг·К.

Це кожухотрубний теплообмінник, який має такі параметри та їх значення:

- площа поверхні теплообміну – $F = 509$ м²;
- довжина труб – $L = 9$ м;
- діаметр кожуха – $D_k = 1,2$ м;
- зовнішній діаметр труб – $d_n = 0,02$ м;
- внутрішній діаметр труб – $d_{вн} = 0,016$ м;
- кількість труб – $n = 986$.

В якості альтернативи розглянуто метод обігріву труби НКТ електричним кабелем КнМНБФэ-1,5-1000-200 [3] і були використані такі ж вхідні умови, як і для обігріву за допомогою теплового насоса.

Аналіз розрахунків показав, що для обігріву труби НКТ з нафтою за допомогою гнучкої вихідної труби теплового насоса втрати по всій довжині ділянки, що обігривається, труби НКТ склали 21510 Вт, а електропроводом 52787 Вт, потужність яка необхідна для обігріву 1 погонного метра труби НКТ у першому способі складала 53 Вт/м, а у другому - 131 Вт/м.

Взявши за основу вартість електроенергії на грудень 2017 року, проведено порівняння обох способів нагріву. Витрати на підігрів труби НКТ від електрокабеля склали 22736 грн. за рік, а від теплового насоса 7968 грн. за рік. Отже, при експлуатації свердловини після заміни способу нагрівання з електрокабеля на тепловий насос, річний економічний ефект складе $E_p=14768$ грн.

Термін окупності системи запобігання процесу відкладення парафінів складає 4,8 років.

Висновок

Отже, з точки зору енерговитрат та капітальних витрат на функціонування системи запобігання відкладенню парафінів в свердловині, доцільним є використання саме теплового насоса. Термін окупності в 4,8 роки обумовлений більшою вартістю елементів теплового насоса та роботами по встановленню його елементів на свердловині.

Список використаної літератури

1. Персіянцев М.Н. Висхідний видобуток нафти в ускладнених умовах. - М.: ТОВ "Надра-Бізнесцентр", 2000. - 653 с.
2. Метод газоимпульсной обработки скважин / Зотов В.С., Альнабуда А.С.Д., Губарь В.А., Караогланов С.А. – СПб.: «Галея Принт», 2004. – 200 с.
3. Продукция для нефтегазового комплекса [Електронний ресурс] / ООО Псковкабель. С.22. Режим доступу http://pskovgeokabel.ru/products/1_24/
4. Пат. 119701 Україна, МПК (2006.01) E21B 43/34, F24J 3/08 Пристрій запобігання процесу відкладення парафіну на стінках нафтової свердловини / Лотонова О.В., Лістовщик Л.К., Шевчук С.П., Задвернюк В.В.; заявник і власник патенту Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». - №u2017 01412 заявл. 15.02.2017; опубл. 10.10.2017, Бюл. №19.
5. Т.О. Ринкова, В.П. Баб'як, В.І. Шкляр. Кожухотрубний теплообмінник: Методичні вказівки до виконання розрахункової частини курсового проекту з дисципліни "Теплотехнічні процеси та установки" для студентів усіх форм навчання спеціальності "Енергетичний менеджмент" – К.: ІВЦ Видавництво «Політехніка», 2005. - 50 с.

L. Listovshchyk, Cand. Sc. (Eng), Assoc. Prof., ORCID 0000-0003-3413-1802

O. Lotonova, student

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

ENERGY-SAVING SYSTEM TO PREVENT OF THE PROCESS OF PARAFFIN ACCUMULATION ON THE WALLS OF AN OIL WELL

The results of analytical researches of the tubing heating system of tubes are presented in order to prevent the deposition of paraffins on its walls using the electric cable and the heated circuit of the heat pump. The analysis of the results was carried out and the method of heating the pipes with the use of a heat pump was chosen.

Was proved that when using a heat pump for heating a pipe, in comparison with the use of an electric cable, energy costs and money costs for the purchase of electric power are significantly reduced.

Keywords: oil well, heat pump, paraffin cap, heating cable.

References

1. Persiyantsev M.N. Vydobutok nafty v uskladnykh umovakh. - M.: TOV "Nadra-Biznestsentr", 2000. - 653 s.
2. Metod hazoypul'noy obrabotky skvazhyn / Zotov V.S., Al'nabuda A.S.D, Hubar' V.A., Karaohlanov S.A. – SPb.: «Haleya Prynt», 2004. – 200 s.
3. Produktsyya dlya neftefazovoho kompleksa [Elektronnyy resurs] / OOO Pskovkabel'. S.22. Rezhym dostupu http://pskovgeokabel.ru/products/1_24/
4. Pat. 119701 Ukrayina, MPK (2006.01) E21V 43/34, F24J 3/08 Prystryi zapobihannya protsesu vidkladennya parafinu na stinkakh naftovoyi sverdlovyny / Lotonova O.V., Listovshchyk L.K., Shevchuk S.P., Zadvernyuk V.V.; zayavnyk i vlasnyk patentu Natsional'nyy tekhnichnyy universytet Ukrayiny «Kyivskyy politekhnichnyy instytut imeni Ihorya Sikors'koho». - #u2017 01412 zayavl. 15.02.2017; opubl. 10.10.2017, Byul. #19.
5. T.O. Rynkova, V.P. Bab"yak, V.I. Shklyar. Kozhukhotrubnyy teploobminnyk: Metodychni vkazivky do vykonannya rozrakhunkovoyi chastyi kursovoho proektu z dystsypliny "Teplootekhnichni protsesy ta ustanovky" dlya studentiv usikh form navchannya spetsial'nosti "Enerhetychnyy menedzhment" – K.: IVT's Vydavnytstvo «Politekhnik», 2005. - 50 s.

Л.К. Листовщик, канд. техн. наук, доц. ORCID 0000-0003-3413-1802,

О.В. Лотонова, студентка.

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

ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩАЯ СИСТЕМА ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ПРОЦЕССА ОТЛОЖЕНИЯ ПАРАФИНА НА СТЕНКАХ НЕФТЯНЫХ СКВАЖИН

Представлены результаты аналитических исследований системы обогрева трубы НКТ с целью предотвращения отложения парафинов на ее стенках с использованием как греющего электрокабеля, так и контура теплового насоса. Проведен анализ результатов и выбран способ нагрева труб с использованием теплового насоса.

Доказано, что при использовании теплового насоса для нагрева трубы, по сравнению с использованием электрокабеля, происходит значительное сокращение энергозатрат и денежных затрат на электроэнергию.

Ключевые слова: нефтяная скважина, тепловой насос, парафиновая пробка, кабель для нагрева.

Надійшла 15.02.2018

Received 15.02.2018

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ НАДЛИШКУ ПОВІТРЯ НА ПРОЦЕС НАГРІВАННЯ БАГАТОКАМЕРНОЇ ПЕЧІ ВИПАЛЮВАННЯ ДИМОВИМИ ГАЗАМИ

Якісне управління процесом випалювання вуглецевих виробів шляхом зміни параметрів технологічного режиму дозволяє досягнути меншого виходу бракованої продукції. Саме тому моделювання основних етапів процесу випалювання з врахуванням максимальної кількості факторів впливу, яке дозволить мінімізувати час та вартість виробництва готової продукції є важливою науковою задачею. У зв'язку з тим, що виконати дослідження на промисловому обладнанні неможливо з технічних та економічних причин, як метод дослідження використовувалося математичне моделювання.

Проведено дослідження впливу надлишку витрати повітря, що спалюється разом з природним газом, на температурні поля камери печі на етапі її нагрівання димовими газами. Виявлено закономірності зміни середнього значення перепаду температур по заготовкам на різних етапах нагрівання при різних режимах роботи. Досліджено особливості характерних зон печі під час процесу нагрівання камери печі димовими газами.

Побудовані температурні поля камери печі та заготовок, на підставі яких проаналізовані перепади температур по заготовках, що суттєво впливають на якість вихідної продукції. Представлені гістограми мінімальних та максимальних температур по заготовках наприкінці процесу нагрівання для різних режимів витрат повітря.

Ключові слова: випалювання вуглецевих виробів, димові гази, багатоканерна піч, температурні поля, перепад температур, надлишок повітря.

Вступ

Широкого застосування у різних галузях промисловості знайшли вуглецеві вироби у вигляді графітованих електродів, ніпелів, вуглецевих блоків, анодів тощо.

Одним із ключових етапів виробництва вуглеграфітових виробів, де вироби набувають механічної міцності, термостійкості, електро- та теплопровідності є випалювання - термічна обробка при температурах 900-1300 °С.

У зв'язку з цим підвищення ефективності процесу випалювання вуглецевих виробів є актуальною науково-технічною задачею.

Мета та завдання

Процес випалювання умовно розділяють на три етапи: нагрівання димовими газами, «камера під вогнем» та охолодження.

Якість вуглецевих виробів визначається державним стандартом ДСТУ 4494:2005, технічними умовами ТУ У 27.9-00196204-005:2013, в яких висуюються вимоги до механічної міцності, термостійкості, електро- та теплопровідності, густини, пористості, модуля пружності, вмісту золи тощо. Всі ці показники у процесі випалювання заготовок повністю визначаються температурним режимом процесу [1-2].

Оскільки нагрівання камери печі димовими газами є першим етапом процесу випалювання, то збільшення однорідності температурного поля заготовок на цьому етапі сприяє зменшенню його нерівномірності на наступних стадіях обробки.

Саме тому задача визначення залежності температурних полів при нагріванні камери печі димовими газами від технологічних параметрів процесу є актуальною. До таких параметрів відносяться: розрідження, витрата палива, надлишок повітря.

Метою даного дослідження є визначення впливу надлишку витрати повітря, що спалюється разом з природним газом, на температурні поля процесу випалювання вуглецевих виробів на етапі їх нагрівання димовими газами.

Опис умов дослідіу

У дослідженні розглядається касета печі випалювання з розміром 3,8×0,76×4,05 м, у якій розміщено 5 заготовок діаметрами 700 мм та висотою 2100 мм. Прийнято, що тривалість процесу випалювання 480

год., число камер на охолодженні – 1, число камер під вогнем – 1, число камер на підігріві димовими газами – 4, відповідно темп випалювання складає 96 год. Розглядається одна камера, що послідовно проходить 4 етапи підігріву димовими газами.

Прийнято, що початкова температура всіх складових касети печі складає 300 К. Температура димових газів та розрідження у камерах печі наведено у табл. 1 [3].

Таблиця 1 – Розподіл температур і розріджень по камерах печі

Камери	вогнева	1	2	3	4
t, °C	1300	1080	830	680	560
Па/9,80665	0,5-1	1,2	2,5	4	5,6

Для подальшого числового моделювання прийнято наведені в таблицях 2–5 фізичні властивості матеріалів печі випалювання та її завантаження відповідно до [2;4-5]:

Таблиця 2 – Теплофізичні властивості вогнетривкого шамоту

T, K	ρ , кг/м ³	Cp, Дж/(кг·K)	λ , Вт/(м·K)
273	1900	675	0,84
323	1900	797	-
373	1900	877	-
423	1900	933	-
473	1900	975	-
523	1900	1008	0,99
773	1900	1111	1,14
1023	1900	1176	1,29
1273	1900	1230	1,44
1523	1900	1279	1,59

Таблиця 3 – Теплофізичні властивості матеріалу заготовок

T, K	ρ , кг/м ³	Cp, Дж/(кг·K)	λ , Вт/(м·K)
273	1635	690	8
400	1635	893	-
500	1635	1160	8,3
600	1635	1315	-
700	1635	1423	-
800	1635	1501	8,5
900	1635	1566	-
1000	1635	1620	8,8
1100	1635	1669	-
1200	1635	1710	9,3
1400	1635	1790	-

Таблиця 4 – Теплофізичні властивості теплоізоляційної шихти

Т, К	ρ , кг/м ³	C_p , Дж/(кг·К)	λ , Вт/(м·К)
273	800	690	0,35
400	800	893	-
500	800	1160	-
600	800	1315	-
700	800	1423	-
800	800	1501	0,73
900	800	1566	-
1000	800	1620	-
1100	800	1669	-
1200	800	1710	1,25
1400	800	1790	-

Таблиця 5 – Теплофізичні властивості повітря

Т, К	C_p , Дж/(кг·К)	λ , Вт/(м·К)
273	1005	0,0244
373	1009	0,0321
473	1026	0,0393
573	1047	0,046
673	1068	0,0521
773	1093	0,0574
873	1114	0,0622
973	1135	0,0671
1073	1156	0,0718
1173	1172	0,0763
1273	1185	0,0807
1373	1197	0,085
1473	1210	0,0915

Розрахунок витрати димових газів

Враховуючи, що нагрівання камери печі відбувається димовими газами у результаті горіння природного газу, для проведення чисельного моделювання необхідно провести розрахунок витрати димових газів у залежності від надлишку повітря, що йде на подальше горіння палива.

Теоретично потрібна витрата повітря для горіння залежить від складу палива, а для природного газу визначається таким чином [6]:

$$L_0 = 0,0476(2\text{CH}_4 + 3,5\text{C}_2\text{H}_6 + 5\text{C}_3\text{H}_8 + 6,5\text{C}_4\text{H}_{10} + 8\text{C}_5\text{H}_{12}) \quad (1)$$

де $\text{CH}_4, \text{C}_2\text{H}_6 \dots$ - відсоткові відношення

Дійсна витрата сухого повітря з урахуванням коефіцієнта витрати повітря [6]:

$$L_a = aL_0 \quad (2)$$

де a - коефіцієнт витрати повітря, що показує відношення дійсної кількості повітря, введеного для горіння, до теоретично потрібного. Для газу та мазуту коефіцієнт витрати повітря $a=1,05-1,20$ [6].

При повному згоранні палива утворюються продукти горіння у вигляді $\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}, \text{SO}_2$ та N_2 . Якщо горіння відбувається з надлишком повітря, то у димових газах буде присутній кисень. Загальна витрата продуктів горіння при надлишку повітря буде

$$V_a = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{SO}_2} + V_{\text{N}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{O}_2} \quad (3)$$

де $V_{\text{CO}_2}, V_{\text{SO}_2}, V_{\text{N}_2}, V_{\text{H}_2\text{O}}, V_{\text{O}_2}$ - об'єми продуктів горіння.

Об'єм продуктів горіння для природного газу можна визначити так [6]:

$$V_{\text{O}_2} = 0,21L_0(a-1), \quad (4)$$

$$V_{\text{CO}_2} = 0,01(\text{CO}_2 + \text{CH}_4 + 2\text{C}_2\text{H}_6 + 3\text{C}_3\text{H}_8 + 4\text{C}_4\text{H}_{10} + 5\text{C}_5\text{H}_{12}), \quad (5)$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = 0,01(2\text{CH}_4 + 3\text{C}_2\text{H}_6 + 4\text{C}_3\text{H}_8 + 5\text{C}_4\text{H}_{10} + 6\text{C}_5\text{H}_{12} + \text{H}_2\text{O} + 0,16dL_a) \quad (6)$$

$$V_{\text{N}_2} = 0,79L_a + 0,01N_2, \quad (7)$$

де $\text{CH}_4, \text{C}_2\text{H}_6 \dots$ - відсоткові відношення, L - теоретично потрібна витрата сухого повітря для горіння, L_a - дійсна витрата сухого повітря.

Для складу газу, наведеного у табл.6

Таблиця 6 – Склад природного газу.

CH_4	C_2H_6	C_3H_8	C_4H_{10}	C_5H_{12}	CO_2	N_2	H_2O	Сума
93,0	1,2	0,7	0,4	0,2	0,2	3	1	100

та при надлишку повітря $a = 1,2$ та $a = 1,1$ відповідно отримуємо:

Загальна витрата продуктів горіння:

$$V_{\text{длм}} = BV_a \quad (8)$$

$$V_{a=1,2} = (1,003 + 2,146 + 8,953 + 0,396) \cdot 30 = 375 \text{ м}^3/\text{год}$$

$$V_{a=1,1} = (1,003 + 2,131 + 8,217 + 0,198) \cdot 30 = 346,5 \text{ м}^3/\text{год}$$

Відповідно до витрати палива $30 \text{ м}^3/\text{год}$, витрата димових газів при надлишку повітря $a = 1,2$ складає $375 \text{ м}^3/\text{год}$, при надлишку повітря $a = 1,1$ - $346,5 \text{ м}^3/\text{год}$.

Результати дослідження

У результаті проведеного моделювання (див. рис. 1) наприкінці першого етапу нагрівання печі димовими газами при надлишку повітря $a = 1,1$ та $a = 1,2$ при максимальній температурі димових газів 833 К та розрідженні 55 Па отримано: максимальними є температури стінок вогневого колодязя, що складають 557 К при $a = 1,2$, а при $a = 1,1$ досягає 549 К ; мінімальні температури - температури протилежних стінок при $a = 1,2$ складає 332 К , при $a = 1,1$ становить 330 К . Відповідно перепад температур по всьому об'ємові касети складає 225 К та 219 К .

При збільшенні витрати димових газів температури по всьому об'ємові касети збільшується, проте збільшується і перепад температур.

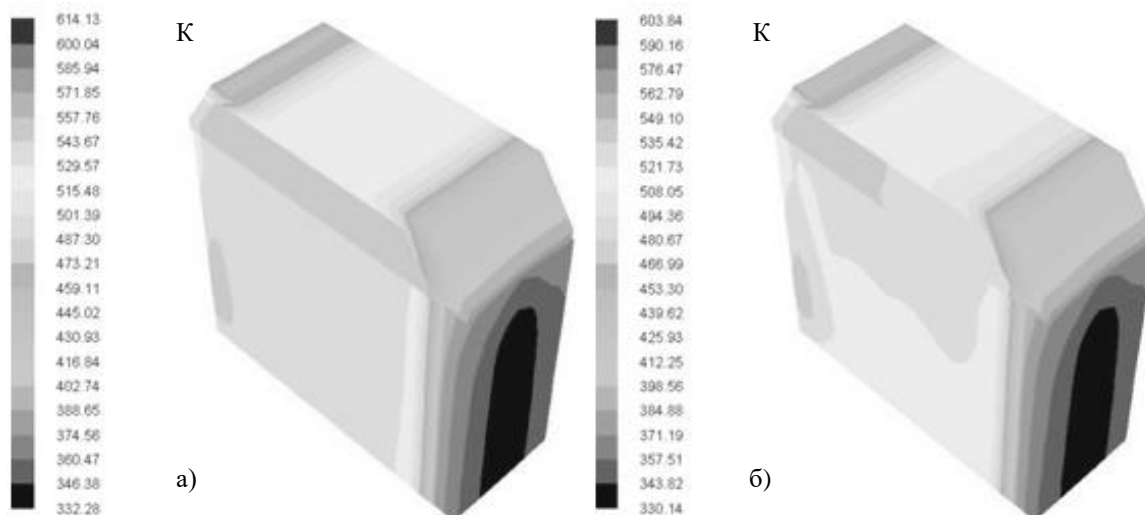


Рисунок 1 – Температурні поля касети при нагріванні димовими газами наприкінці першого етапу: а) при надлишку повітря $a=1,2$; б) при надлишку повітря $a=1,1$

З рис. 1 видно наявність трьох особливих зон печі. Зона 1 – «гаряча зона» печі – зона, де температура досягає максимуму. Наявність цієї зони обумовлена розташуванням тут газового каналу, через який подаються димові гази, а тому і значення температур тут найвищі.

Зона 2 – «підсклепінчата зона» печі. Особливість цієї зони полягає у її розташуванні. У зв'язку з тим, що під склепінням печі завжди знаходиться велика кількість димових газів, то і нагрівання зони 2 відбувається досить інтенсивно у порівнянні з іншими частинами касети.

Зона 3 – «холодна зона» печі. Наявність даної зони обумовлена значним охолодженням димових газів, температура яких значно нижче у зв'язку з їх охолодженням при проходженні газового тракту печі. Тому і нагрівання у цій зоні відбувається найдовше.

Результати дослідження температурних полів пересипки наприкінці першого етапу нагріву показали, що температурні поля в обох випадках майже однакові та відрізняються лише значеннями температур. Перепади температур по всьому об'єму пересипки досить значні та становлять близько 170 К. Результати моделювання демонструються на рис. 2.

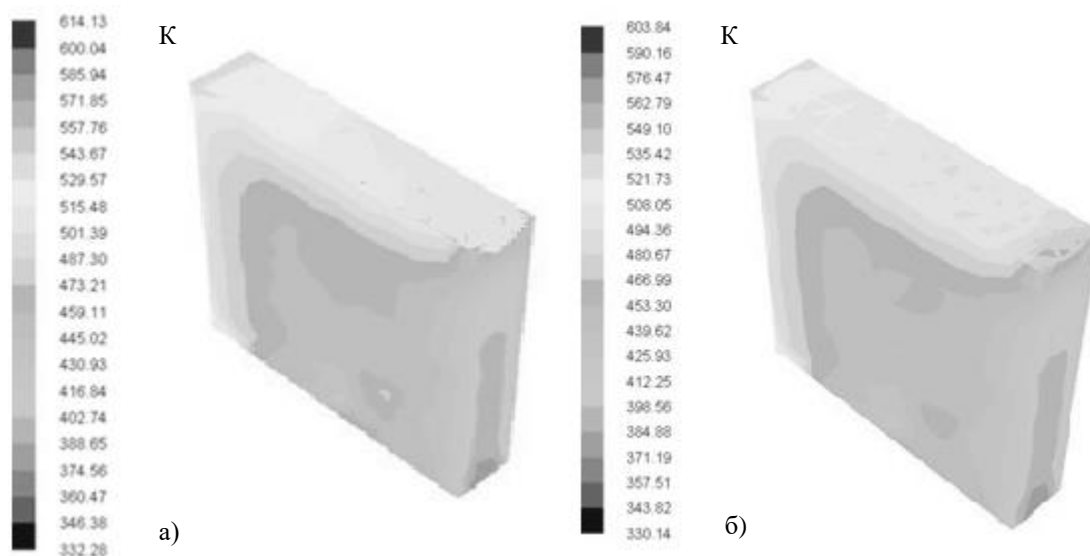


Рисунок 2 – Температурні поля пересипки при нагріванні димовими газами наприкінці першого етапу: а) при надлишку повітря $a=1,2$; б) при надлишку повітря $a=1,1$

Проведені дослідження показали, що температура заготовок зменшується зверху до низу печі, що пояснюється зменшенням температури димових газів при проходженні газового тракту камери печі. Очевидним є перепад температури заготовок – від більш теплої сторони печі до більш холодної. Результати наведені на рис. 3.

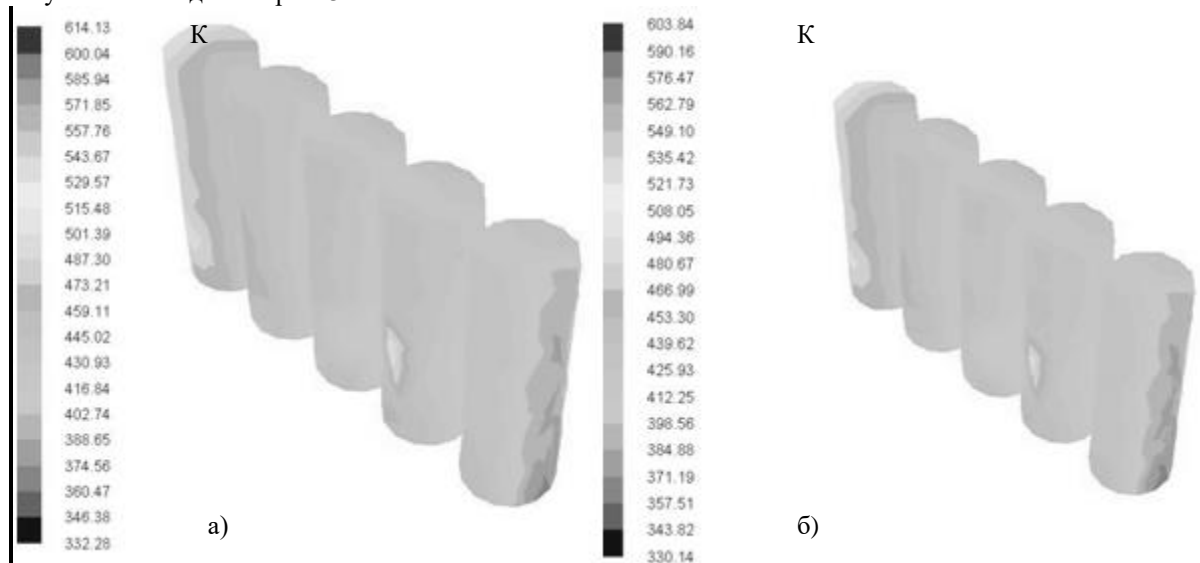


Рисунок 3 – Температурні поля заготовок при нагріванні димовими газами напри кінець першого етапу: а) при надлишку повітря $a=1,2$; б) при надлишку повітря $a=1,1$

За результатами чисельного моделювання побудовано гістограми мінімальних та максимальних температур по всім заготовкам для даного етапу (рис. 4). З результатів видно, що середнє значення перепаду температур по всіх заготовках при надлишку повітря $a=1,2$ складає 17 К, при надлишку повітря $a=1,1$ – 15,2 К.

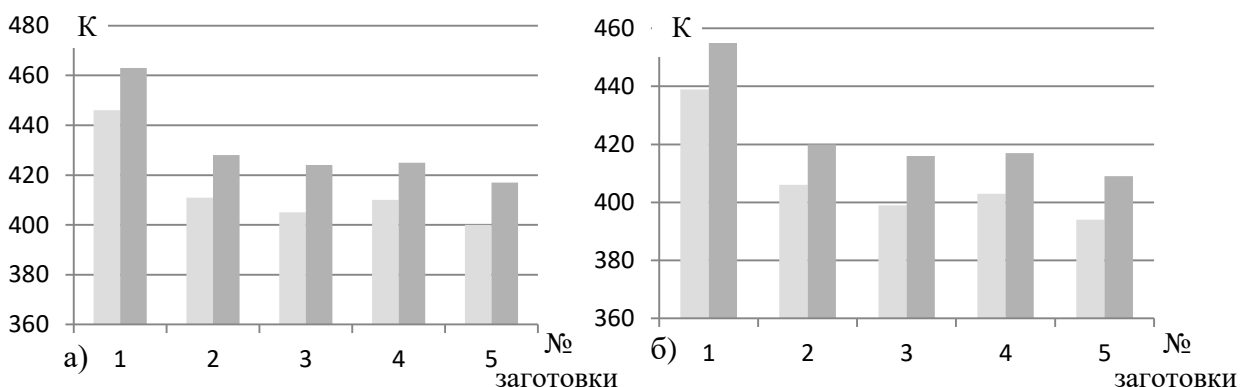


Рисунок 4 – Гістограма мінімальних та максимальних значень температури по заготовкам наприкінці першого етапу нагрівання: а) при надлишку повітря $a=1,2$; б) при надлишку повітря $a=1,1$

Як вказувалось вище процес нагрівання камери димовими газами відбувається у декількох камерах, кількість яких залежить від технологічної ситуації у процесі випалювання. У даному дослідженні розглядаються 4 камери. Вище наведені результати дослідження для першої з них. Результати моделювання температурних режимів решти камер наведено у табл. 7.

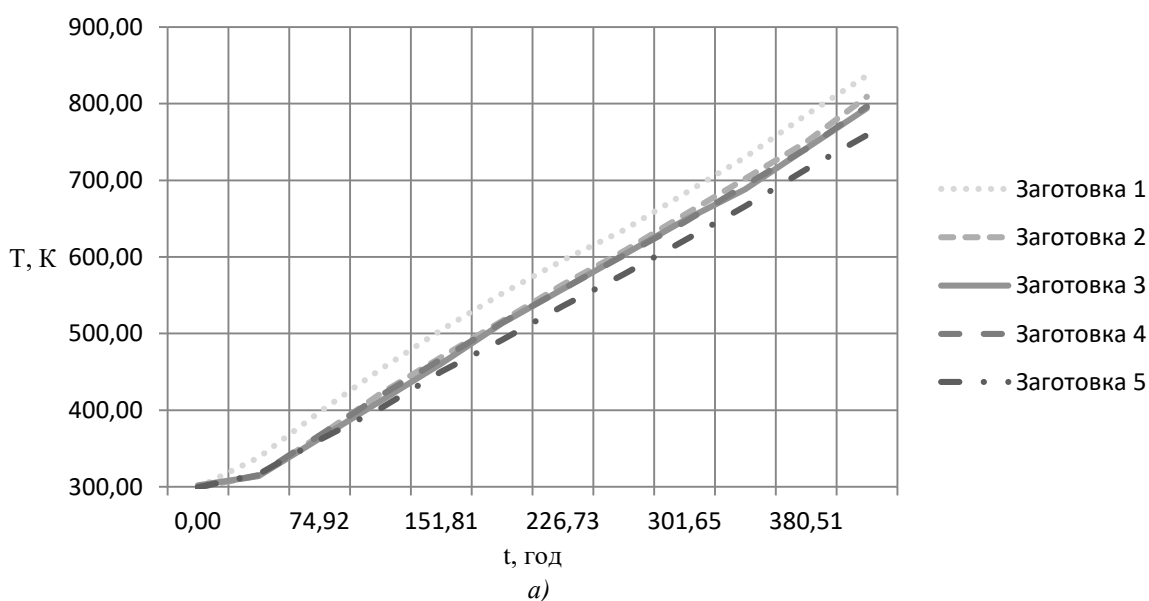
Таблиця 7 – Результати моделювання нагрівання димовими газами 2-4 камер

Назва параметру/Дослідження	№1	№2
Надлишок повітря	$a=1,2$	$a=1,1$
Камера 2 при максимальній температурі димових газів 953 К та розрідженні 39 Па		
Максимальна температура стінок вогневого колодязя	666 К	654 К

Продовження табл. 7

Мінімальна температура протилежних вогневим колодязям стінок	423 К	416 К
Перепад температури по всьому об'ємові касети	243 К	238 К
Перепади температур по всьому об'ємові пересипки	180 К	180 К
Середнє значення перепаду температури по всіх заготовках	18,8 К	17,4 К
Камера 3 при максимальній температурі димових газів 1103 К та розрідженні 25 Па		
Максимальна температура стінок вогневого колодязя	805 К	789 К
Мінімальна температура протилежних вогневим колодязям стінок	534 К	523 К
Перепад температури по всьому об'ємові касети	271 К	266 К
Перепади температур по всьому об'ємові пересипки	190 К	190 К
Середнє значення перепаду температури по всіх заготовках	18 К	17,4 К
Камера 4 при максимальній температурі димових газів 1353 К та розрідженні 12 Па		
Максимальна температура стінок вогневого колодязя	967 К	948 К
Мінімальна температура протилежних вогневим колодязям стінок	663 К	647 К
Перепад температури по всьому об'ємові касети	305 К	301 К
Перепади температур по всьому об'ємові пересипки	210 К	210 К
Середнє значення перепаду температури по всіх заготовках	17 К	22,6 К

На рис. 5-6 представлені графіки змін максимальних та мінімальних температур по кожній з заготовок наприкінці нагрівання димовими газами у всіх 4-х камерах.



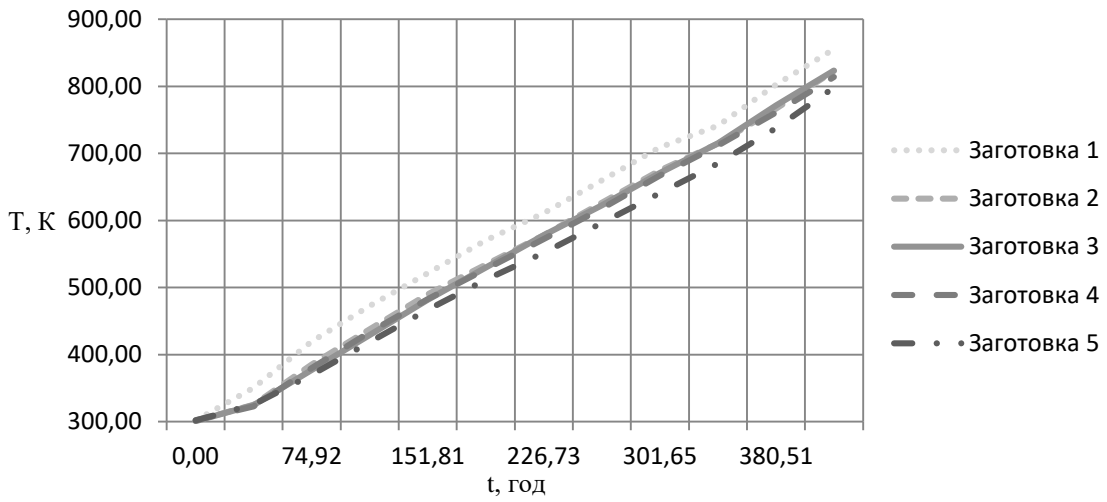


Рисунок 5 – Графіки зміни мінімальної (а) та максимальної (б) температур по заготовкам при надлишку повітря $\alpha = 1,2$

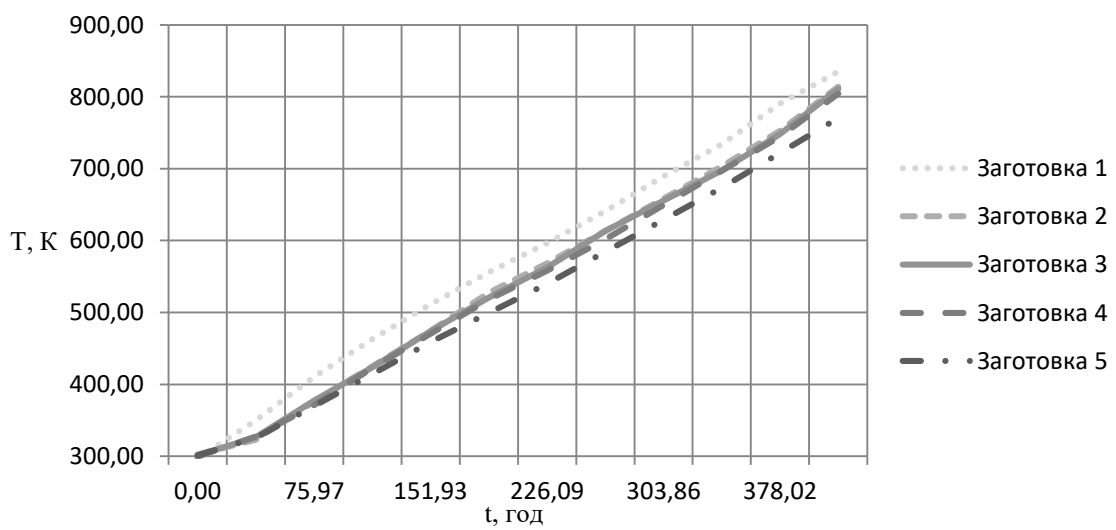
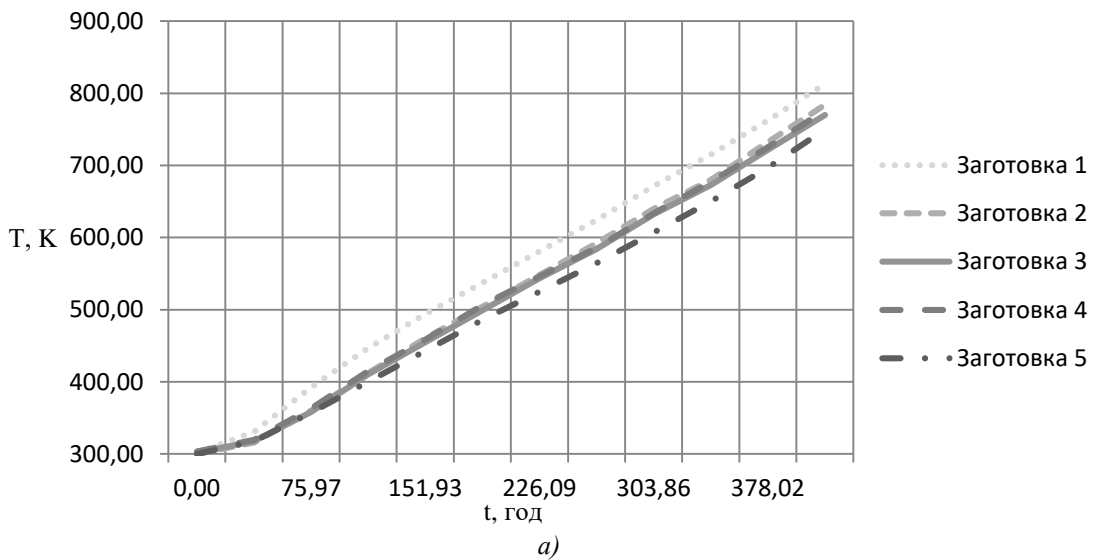


Рисунок 6 – Графіки зміни мінімальної (а) та максимальної (б) температур по заготовкам при надлишку повітря $\alpha = 1,1$

За результатами чисельного моделювання побудовано гістограми мінімальних та максимальних температур по всім заготовкам наприкінці нагрівання камер печі димовими газами (рис 7). З результатів видно, що середнє значення перепаду температур по всіх заготовках при надлишку повітря $a=1,2$ складає 17 К, при надлишку повітря $a=1,1$ – 22,6 К.

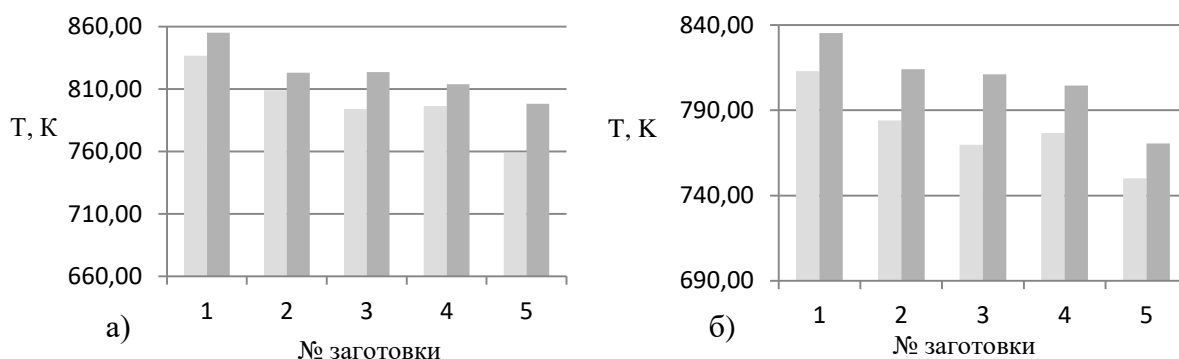


Рисунок 7 – Гістограма мінімальних та максимальних значень температури по заготовкам наприкінці нагрівання димовими газами: а) при надлишку повітря $a=1,2$; б) при надлишку повітря $a=1,1$

Висновки

Проведено дослідження впливу надлишку витрати повітря, що спалюється разом з природним газом, на температурні поля камер печі випалювання вуглецевих виробів, які нагріваються димовими газами.

Наведений розрахунок витрати димових газів при різних значеннях надлишку витрати повітря.

Побудовані температурні поля камери печі та заготовок, на підставі яких проаналізовані перепади температур по заготовках, що суттєво впливають на якість вихідної продукції.

Представлені гістограми мінімальних та максимальних температур по заготовках наприкінці процесу нагрівання для різних режимів витрат повітря.

Наведені графіки зміни мінімальних та максимальних температур по заготовках протягом всієї стадії нагрівання димовими газами.

У подальших дослідженнях доцільно розглянути вплив інших технологічних параметрів (розрідження, витрати палива) на температурні поля камери печі при нагріванні димовими газами.

Список використаної літератури

1. Санников А. К. Производство электродной продукции / А. К. Санников, А. Б. Сомов, В. В. Ключников [и др.] – М. : Металлургия, 1985. – 128 с.
2. Лутков А. И. Тепловые и электрические свойства углеродных материалов / А. И. Лутков. — М. : Металлургия, 1990. — 175 с.
3. Чалых Е.Ф., Пашенкова Л.Ф. Печи электродных заводов Учебное пособие. - Москва: МХТИ им. Д.И. Менделеева, 1983. - 76 с.
4. А.с. 1755025 СССР. Способ укрытия теплоизоляционной шихты печи графитации /П. П. Сапко, В. П. Овсянников (СССР). — Открытия. Изобретения ; опубл. 1992, Бюл. № 30.
5. Угольные и графитовые электроды для электропечей и электролизеров / (Систематическое собрание патентов, сост. М. Б. Шварцберг). — Л.-М., 1938.
6. Левченко П.В. Расчеты печей и сушил иликатной промышленности Москва, Высшая школа, 1968. - 363 с.

O. Zhuchenko, Cand. Sc. (Eng), Assoc. Prof., ORCID 0000-0001-5611-6529,
A. Korotynskiy, PhD student, ORCID 0000-0002-6309-5970
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

RESEARCH THE INFLUENCE OF EXCESS AIR ON THE PROCESS OF HEATING MULTI-CHAMBER BAKING FURNACE BY USING FLUE GASES

Changing the parameters of the technological regime of the process of baking carbon products allows to achieve a qualitative thermal regime, which fully determines the quality of products. Investigation of the temperature field of the furnace depending on the technological parameters, and their rational use allows to achieve a lower output of defective products. Therefore, it is important to model these processes taking into account the maximum number of factors that will allow to minimize the time and cost of finished products.

Due to the fact that the research on industrial equipment is impossible for technical and economic reasons, as a method of research, mathematical modeling was used.

The study of the influence of excess air flow, burned together with natural gas, on the temperature fields of the furnace chamber at the stage of its heating by flue gases has been carried out. The regularities of the change in the mean value of the temperature drop across the blanks at different heating stages under different operating conditions were revealed. The features of the characteristic zones of the furnace during the process of heating the furnace chamber with flue gases are studied. The main attention of the research was paid to the issues of homogeneity of the temperature field of blanks, which significantly affects their quality.

Is given the calculation of the flow of flue gases at various values of excess air flow.

The temperature fields of the furnace chamber and the blanks have been constructed, on the basis of which the temperature drop across the blanks has been analyzed, which substantially affects the quality of the output product.

Are presented the histograms of the minimum and maximum temperatures on the blanks at the end of the heating process for different modes of air flow a

The graphs of changes in the minimum and maximum temperatures for blanks during the entire stage of heating by flue gases are given.

In further studies in this area, it is advisable to consider the influence of other technological parameters such as underpressure and fuel consumption on the temperature fields of the furnace chamber when heated by flue gases.

Keywords: burning of carbon products, flue gases, multi-chamber furnace, temperature fields, temperature difference, excess air.

References

1. Sannikov A. K. Proizvodstvo jelektrodnoj produkcii / A. K. Sannikov, A. B. Somov, V. V. Kljuchnikov [i dr.] – M. : Metallurgija, 1985. – 128 s.
2. Lutkov A. I. Teplovyje i jelektricheskie svojstva uglerodnyh materialov / A. I. Lutkov. — M. : Metallurgija, 1990. — 175 s.
3. Chalyh E.F., Pashhenkova L.F. Pechi jelektrodnyh zavodov Uchebnoe posobie. - Moskva: MHTI im. D.I. Mendeleeva, 1983. - 76 s.
4. \A.s. 1755025 SSSR. Sposob ukrytija teploizoljacionnoj shihty pechi grafitacii /P. P. Sapko, V. P. Ovsjannikov (CCCR). — Otkrytija. Izobretenija ; opubl. 1992, Bjul. № 30.
5. Ugol'nye i grafitovye jelektrody dlja jelektropechej i jelektrolizerov / (Sistematicheskoe sobranie patentov, sost. M. B. Shvarcberg). — L.-M., 1938.
6. Levchenko P.V. Raschety pechej i sushil ilikatnoj promyshlennosti Moskva, Vysshaja shkola, 1968. - 363 s.

Надійшла 15.04.2018
Received 15.04.2018