

Д.Г. Дерев'яно¹, доцент, к.т.н., ORCID 0000-0002-4877-5601С.В. Зайченко¹, проф., д-р, ORCID 0000-0002-8446-5408В.А. Побігайло¹, доцент, к.т.н., ORCID 0000-0003-2673-7329Д.С. Зайченко², учень, ORCID 0000-0003-1527-0006¹Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

²Інтегрована об'єднана школа Единхайма

ОБҐРУНТУВАННЯ І РОЗВИТОК КОНСТРУКЦІЇ ПАРАМЕТРІВ ПАРАФІНОВИХ АВТОНОМНИХ ОБІГРІВАЮЧИХ ПРИСТРОЇВ(ОКОПНИХ СВІЧОК)

В роботі представлено загальну концепцію створення автономних обігрівачів пристроїв з врахуванням особливостей теплових процесів які відбуваються при генерації, акумулюванні та споживанні тепла генерованого у процесі горіння парафіну. Встановлено головні закономірності теплового випромінювання парафінових автономних обігрівачів пристроїв з врахуванням особливостей взаємодії складових елементів, що дозволить встановити взаємні впливи різних частин об'єкту дослідження на його стан. Головною метою проведених досліджень стало експериментальне дослідження з розробкою нових конструкцій парафінових автономних обігрівачів пристроїв з врахуванням особливостей теплових процесів які відбуваються при генерації, акумулюванні та споживанні тепла. Вперше експериментально досліджено процес горіння парафінового обігрівача пристрою різної потужності за умов які з максимальною ступеню наближені до натурних та експлуатаційних. На основі експериментальних даних визначено питомі показники потужності горіння, передачі тепла і коефіцієнт корисної дії парафінової свічки. Визначено, що збільшення потужності парафінових автономних обігрівачів пристроїв призводить до стрімкого зменшення коефіцієнту корисної дії, що пояснюється зменшення стехіометричного коефіцієнту горючої суміші. Встановлено рекомендації, що до оптимізації конструкції парафінових автономних обігрівачів пристроїв, що дозволить знизити витрати парафіну. Розроблена нова конструкція багатофункціонального парафінового автономного обігрівача пристрою, що містить в собі декілька функцій: джерело тепла для приміщення; джерело світла; акумулятор тепла. У якості акумулятора тепла парафінових автономних обігрівачів пристроїв запропоновано використати тонкостінний металевий циліндр з гофрованими стінками для теплового розширення наповнений парафіном.

Ключові слова: окопна свічка, потужність, коефіцієнт корисної дії, парафін, гніт, парафіновий автономний обігрівачий пристрій

Вступ

В умовах військової агресії, що викликає руйнування енергетичної структури, особливої уваги потребують питання, пов'язані з виробництвом і використанням автономних джерел енергії. Одним з важливих питань забезпечення енергією є забезпечення тепловою енергією військових на ділянках з відсутністю енергопостачання[1, 2]. Для вирішення даної проблеми став корисний досвід першої світової війни, зокрема використання каталітичних обігрівачів і "окопних свічок"[3]. Каталітичні обігрівачі не знайшли широкого застосування з причини високої вартості і вузького функціоналу. Сучасні розробки націлені на розвиток електричних нагрівальних пристроїв, що стримується питомими енергетичними показниками акумулюючих пристроїв. Головними перевагами окопних свічок стало: висока надійність, низька вартість, багатофункціональність(джерело світла і тепла), низькі антимаскуючі ознаки(відсутність диму).

Десятки груп волонтерів з різних куточків України виготовляють з підручних засобів сотні тисяч "окопних свічок", що є незамінною допомогою захисникам на передовій. Тільки волонтери Київського політехнічного інституту імені Ігоря Сікорського КПІ за добу 3 грудня 2022 року виготовили понад 5300 свічок[4].

Попри відомість даного способу забезпечення тепловою енергією військових матеріалів і рекомендації, що до параметрів конструкції параметрів парафінових автономних обігрівачів пристроїв(окопних свічок) достатньо обмежена. Також слід відзначити відносно вузьке коло розроблених пристроїв, що використовують парафін у якості джерела енергії. Саме ці обставини змусили авторів статті приділити стільки уваги простому, на перший погляд, питанню.

При вирішенні задачі обґрунтування параметрів конструкції параметрів парафінових автономних обігрівачів пристроїв(окопних свічок) необхідно врахувати накопичений більше ніж сторічний досвід виготовлення і використання парафінових свічок, а також провести аналітичні дослідження, що до

оптимальності розмірів і можливих варіантів конструкції, що дозволить розширити функціональне призначення. Розглядаючи окопну свічу при різних варіантах її призначення, можливо розробити загальні рекомендації, що до проектування і виготовлення даного виду автономного обігрівачого пристрою в комбінації різних пристроїв. Оптимізувати конструкційні параметри і запропонувати нові конструкції парафінових автономних обігрівачих пристроїв можливо при розгляді об'єкта в цілому з дослідженням теплових процесів які відбуваються при генерації, акумулюванні та споживанні тепла.

Мета і завдання дослідження

Метою даного дослідження є розробка нових конструкцій парафінових автономних обігрівачих пристроїв з врахуванням особливостей теплових процесів які відбуваються при генерації, акумулюванні та споживанні тепла.

Для досягнення поставленої мети у роботі вирішувались наступні задачі:

-Розробка структурної схеми джерел теплового випромінювання парафінових автономних обігрівачих пристроїв з врахуванням особливостей взаємодії складових елементів, що дозволить встановити взаємні впливи різних частин об'єкту дослідження на його стан;

-Експериментально дослідити процес горіння парафінової свічки різної потужності. Визначити ККД процесу нагрівання парафіною свічкою;

-Встановити рекомендації, що до оптимізації конструкції парафінових автономних обігрівачих пристроїв, що дозволить знизити витрати парафіну.

Матеріал і результати дослідження

Основним питанням, що дозволяє визначити основні параметри парафінових автономних обігрівачих пристроїв є потужність процесу горіння гніту у парафіні. Процес горіння парафіну у свічці складний і багатоетапний. Спочатку парафін під дією теплового потоку і випромінювання переходить з твердого стану у рідкий. Рухаючись по порам гніту у гору він випаровується. Пари парафіну перемішуючись з повітрям потрапляють у полум'я свічі і згорають[5-7]. Навіть у такій простій постановці даний процес тепломасопереносу з фазовими і хімічними перетвореннями складно описати у аналітичній постановці задачі, не кажучи про її вірне рішення.

Враховуючи обставини пов'язанні зі складністю аналітичного визначення потужності горіння парафінової свічки, авторами проведено ряд експериментальних досліджень.

У якості матеріалів використано парафін марки Т-1 ДСТУ ДСТУ 4153-2003, з температурою плавлення 52°C, щільність при 20°C, 0,826 г/см³ [8]. Гніт ДСТУ 7957-56 виконано з чистого хлопку шириною 22мм[9].

Цілком очевидно, що потужність процесу горіння пропорційна ширині гніту при повному забезпеченні процесу горіння киснем. Проте конструкції свічок, що масово виготовляються мають гніт, що повністю покриває площу свічки у формі "равлика", чи "зірки". Такі форми призводять до не повного згорання парафіну з перевитратами останнього і утворенням на поверхнях продуктів не повного згорання. Враховуючи вказану особливість використання парафінових автономних обігрівачих пристроїв, що призводить до суттєвого зменшення потужності процесу горіння, проведено ряд опитів, метою яких визначення взаємного впливу гніту. Сутність дослідів полягала у визначенні витрат парафіну і фіксації збільшення зростання температури нагрівання ємності з водою(рис. 1).

Експерименти проводились при встановленому процесі горіння і розплавленні верхнього шару парафіну у оточенні теплового екрану. Термометр і ваги фіксувалися зміну температури води ΔT і маси парафіну Δm від часу Δt .

На рис. 2, а, б представлені діаграми зміни температури води ΔT і маси парафіну Δm від часу Δt .

Ефективна потужність N_f , Вт що генерується парафіновим автономним обігрівачим пристроєм(ПАОП):

$$N_f = m_w c_w \frac{\Delta T}{\Delta t}, \quad (1)$$

m_w – маса води; c_w – теплоємність води; ΔT – зміна температури води.

Потужність горіння ПАОП N_0 :

$$N_0 = q_p \frac{\Delta m_p}{\Delta t}, \quad (2)$$

q_p - питома теплота згорання парафіну.

Відповідно ККД ПАОП:

$$\eta_c = \frac{N_f}{N_0} \quad (3)$$

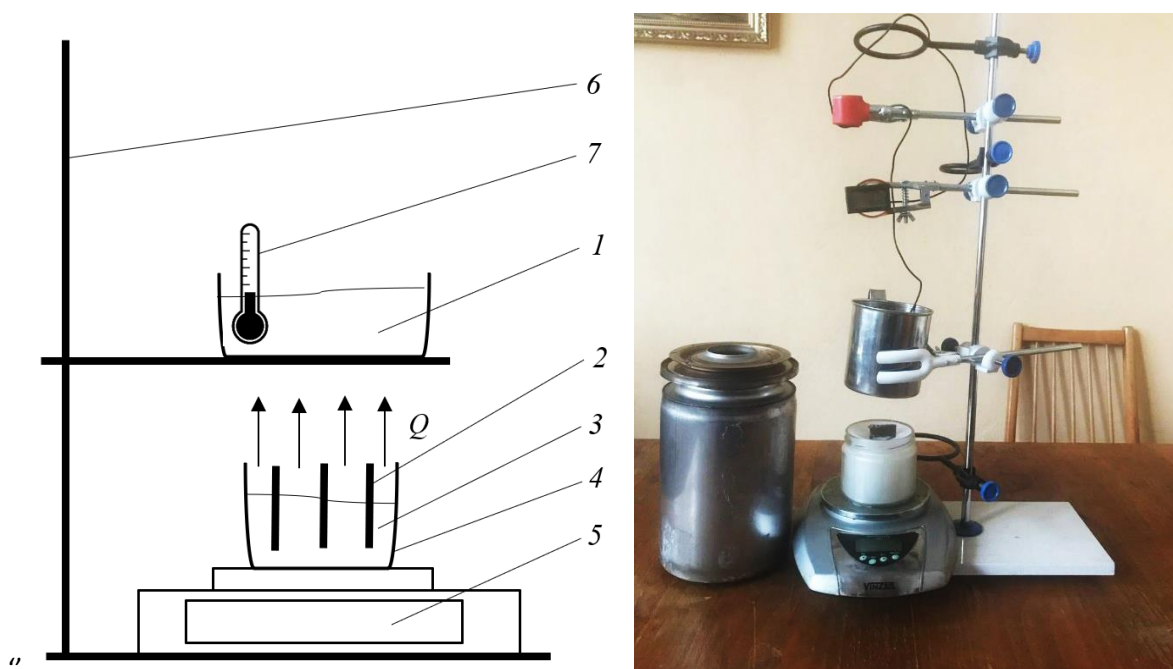


Рис. 1 Схема і зовнішній вид експериментальної установки парафінових автономних обігрівачих пристроїв:

1 – ємність з водою; 2 – гніт; 3 – парафін; 4 – корпус свічки; 5 – ваги; 6 – штатив; 7 – термометр; (захисний тепловий екран не зображено)

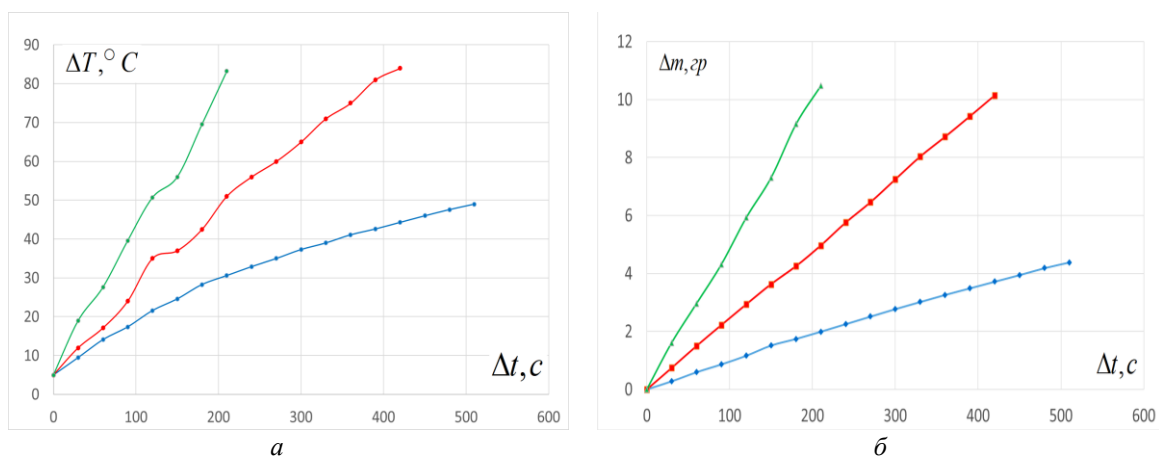


Рис. 2 Діаграми зміни температури води $\Delta T, ^\circ C$ (а) і маси парафіну $\Delta m, \text{гp}$ (б) від часу $\Delta t, \text{c}$:

----- – один гніт; - - - - - – два гніти; - - - - - – три гніти
(маса води 400гр, відстань від гніту 0,05м)

На рис. 3 наведено діаграми зміни ефективної потужності і потужності горіння ПАОП за різних умов проведення дослідів (один, два і три гніти). Відповідно найбільшою потужністю горіння ПАОП склала 1545,8Вт, а мінімальне значення 304Вт. При цьому ефективна потужність складає 144Вт і 464Вт. Відповідно ККД процесів склали 0,48; 0,37 і 0,3. Дане явище пояснюється неповним згоранням парафіну і зменшенням поглинання тепла.

При віднесенні потужності процесів до довжини гніту L_w отримаємо питомі значення, які пов'язанні з геометричними параметрами процесу ПАОП:

$$n_f = \frac{N_f}{L_w}, \quad (4)$$

$$n_0 = \frac{N_0}{L_w}. \quad (5)$$

Так для поставленої серії дослідів питомі потужності склали 6,5/13,8; 7,2/19,2; 7,1/23,4 Вт/мм.

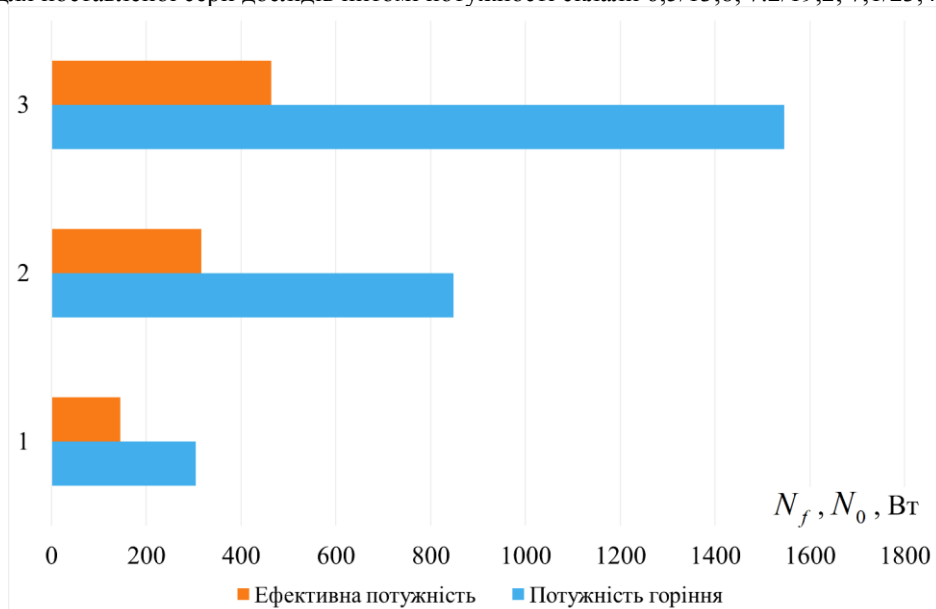


Рис. 3 Діаграми зміни ефективної потужності і потужності горіння ПАОБ

Визначмо мінімальну необхідну потужність ПАОП для нагріву до кипіння 0,3 кг води за 4 хвилини, що є достатньо оптимальною за умов часу. За таких умов корисна потужність ПАОП повинна бути не менше 500Вт. Відповідно повна потужність ПАОП з врахуванням ККД(0,3) повинна бути 1500 Вт. Таким чином оптимальна довжина гніту повинна дорівнювати 65мм. Збільшення даного параметру буде призводити до не виправданих витрат парафіну. Також доцільно використовувати конструкцію з розділеними пелюстками гніту, що дозволить регулювати потужність ПАОП для різних цілей використання.

Для збільшення функціональності ПАОБ авторами розроблено конструкцію свічки, що суміщає в собі декілька функцій:

- джерело тепла для приміщення;
- джерело світла;
- акумулятор тепла.

Зовнішній вигляд прототипу та перетин багатофункціонального ПАОП представлено на рис. 3. Джерелом енергії є парафінова свічка 1 з потужністю меншою 1,5кВт. Тепловим екраном і захистом від вітру виступає корпус 2, що складено з трьох секцій загальною висотою 150мм. Верхні 4 і нижні 2 секції мають по 8 отворів по 10мм для подачі повітря і випуску продуктів горіння. Отвори корпусу при певному налаштуванні по висоті дозволяють використовувати ПАОБ у якості світильника. Верхня частина корпусу 4 може бути використана у якості опори для підігріву ємності з харчовими продуктами. Особливістю рішення, що пропонується є наявність теплового акумулятора 5, що заряджається від теплового потоку свічки. Конструкція теплового акумулятора представляє собою тонкостінний металевий циліндр з гофрованими стінками(на рис.3 не зображено) для теплового розширення наповнений парафіном. Так для обраних геометричних розмірів (0,314дм³) енергія заряду при нагріві до температури 80°C з врахуванням фазового переходу складає 10кДж. Тепловий акумулятор призначено для подальшого контактного способу обігріву особового складу при вимкнених засобах обігріву. Тепловий акумулятор потребує особливої уваги з точки зору його перегрівання. Необхідно враховувати перегрітий парафін при контакті з повітрям самозаймається. Також у якості акумулятора енергії можливо використовувати парафінову свічу з кришкою.

Маса багатофункціонального ПАОП складає 500 гр. з габаритами Ø 110×50мм що дозволяє використовувати пристрій при довгих переходах.

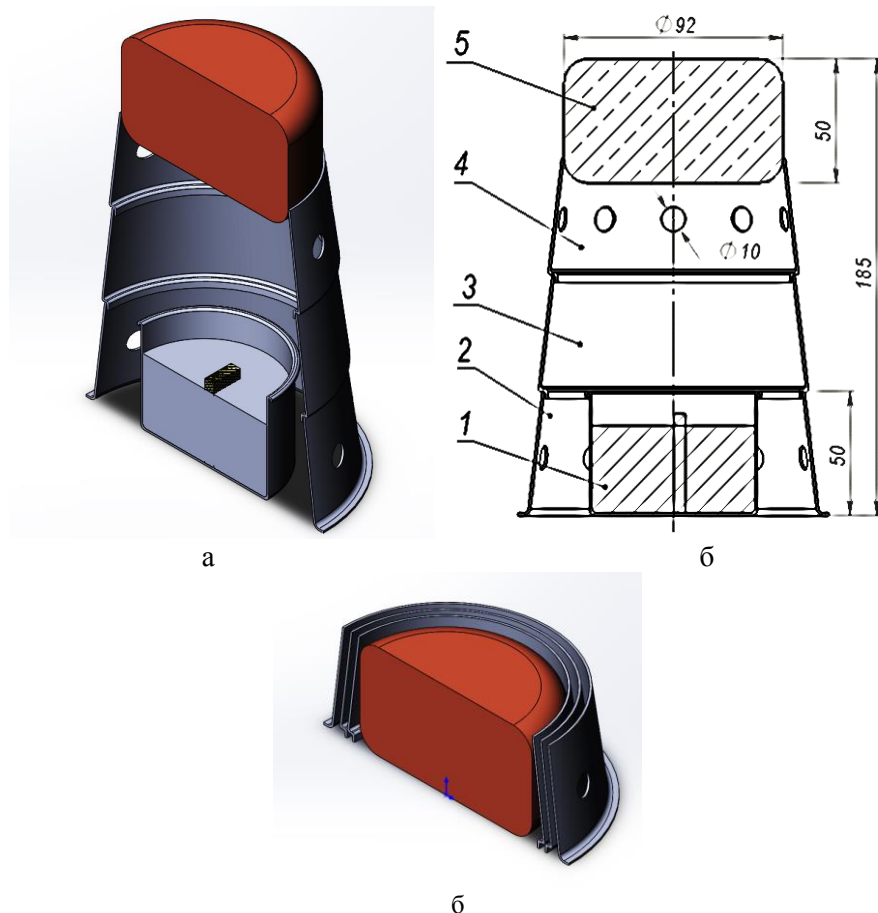


Рис. 3 Зовнішній вигляд прототипу(а) та перетин багатофункціонального ПАОП(б), пристрій у зібраному стані (в)

Висновки

-Встановлено головні закономірності теплового випромінювання парафінових автономних обігрівачів з врахуванням особливостей взаємодії складових елементів, що дозволить встановити взаємні впливи різних частин об'єкту дослідження на його стан;

-Вперше експериментально досліджено процес горіння парафінової свічки різної потужності. Визначено питомі показники потужності горіння, передачі тепла і ККД парафінової свічки. Так питома ефективна потужність горіння керосинового гніту у парафіні склала від 6,5 до 7,1Вт/мм;

-Встановлено рекомендації, що до оптимізації конструкції парафінових автономних обігрівачів, що дозволить знизити витрати парафіну.

-Розроблена нова конструкція багатофункціонального ПАОП, що суміщає в собі декілька функцій: джерело тепла для приміщення; джерело світла; акумулятор тепла.

Список використаної літератури

1. Zaichenko S. et al. Comparison of energy efficiency of a synchronous electric generator with a spark ignition engine using liquefied petroleum gas and gasoline // 2022 IEEE 8th International Conference on Energy Smart Systems (ESS). – IEEE, 2022. – С. 297-301.
2. Zaichenko S. et al. Determining The Effect of Load on Synchronous Generator With Spark-Ignition Engine Energy Efficiency //Latvian Journal of Physics and Technical Sciences. – 2022. – Т. 59. – №. 6. – С. 43-51.
3. Окопні свічки на фронті: наскільки вони необхідні військовим та чи є альтернатива // <https://suspilne.media/361664-okopni-svicki-na-fronti-naskilki-voni-neobhidni-vijskovim-ta-ci-e-alternativa/>
4. Рекорд з виготовлення окопних свічок // <https://kpi.ua/node/19711>.
5. Вплив електричного поля на характеристики плавлення та горіння парафіну / С. Г. Орловська // Фізика і хімія твердого тіла. - 2015. - 16, № 4. - С. 747-750.
6. Актан О. Ю. и др. Фізичні основи конструювання двигуна на парафіновому паливі для гібридних ракет. кінетика плавлення і горіння //Кінетика плавлення і горіння. Космічна наука і технологія. – 2011. – Т. 17. – №. 3. – С. 28-33.
7. Орловська С. Г. Експериментальні дослідження випаровування крапель парафінів //Фізика аеродисперсних систем. – 2022. – №. 60. – С. 187-193.
8. ДСТУ 4153-2003 Парафіни нафтові тверді. Технічні умови. З поправкою. Дата початку дії, 01.01.2004. Дата прийняття, 24.02.2003.

S. Zaichenko¹, Dr. Sc. (Eng.), Prof., ORCID 0000-0002-8446-5408

D. Derevyanko¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0002-4877-5601

V. Pobigailo¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0003-2673-7329

D. Zaichenko², student, ORCID 0000-0003-1527-0006

¹National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

²Edigheim Integrated Combined School, Ludwigshafen, Germany

JUSTIFICATION AND DEVELOPMENT OF THE DESIGN PARAMETERS OF PARAFFIN AUTONOMOUS HEATING DEVICES (TRENCH CANDLES)

The work presents the general concept of creating autonomous heating devices, taking into account the peculiarities of thermal processes that occur during the generation, accumulation and consumption of heat generated in the process of burning paraffin. The main regularities of thermal radiation of paraffin autonomous heating devices have been established, taking into account the peculiarities of the interaction of the constituent elements, which will allow establishing the mutual influence of various parts of the research object on its condition. The main goal of the conducted research was experimental research with the development of new designs of paraffin autonomous heating devices, taking into account the peculiarities of thermal processes that occur during the generation, accumulation and consumption of heat. For the first time, the combustion process of a paraffin heating device of different power was experimentally investigated under conditions that are as close as possible to natural and operational conditions. On the basis of experimental data, the specific indicators of combustion power, heat transfer and efficiency of a paraffin candle were determined. It was determined that an increase in the power of paraffin autonomous heating devices leads to a rapid decrease in the efficiency, which is explained by a decrease in the stoichiometric coefficient of the combustible mixture. Recommendations have been established to optimize the design of paraffin autonomous heating devices, which will allow to reduce the consumption of paraffin. A new design of a multifunctional paraffin autonomous heating device has been developed, which contains several functions: a heat source for the room; light; heat accumulator. It is proposed to use a thin-walled metal cylinder with corrugated walls filled with paraffin as a heat accumulator for paraffin autonomous heating devices.

Key words: trench candle, power, efficiency, paraffin, wick, paraffin autonomous heating device

References

- 1.Zaichenko S. et al. Comparison of energy efficiency of a synchronous electric generator with a spark ignition engine using liquefied petroleum gas and gasoline // 2022 IEEE 8th International Conference on Energy Smart Systems (ESS). – IEEE, 2022. – S. 297-301.
- 2.Zaichenko S. et al. Determining The Effect of Load on Synchronous Generator With Spark-Ignition Engine Energy Efficiency //Latvian Journal of Physics and Technical Sciences. – 2022. – T. 59. – №. 6. – S. 43-51.
- 3.Okopni svichky na fronti: naskilky vony neobkhidni viiskovym ta chy ye alternatyva // <https://suspilne.media/361664-okopni-svicki-na-fronti-naskilki-voni-neobhidni-vijskovim-ta-ci-e-alternativa/>
- 4.Rekord z vyhotovlennia okopnykh svichok // <https://kpi.ua/node/19711>.
- 5.Vplyv elektrychnoho polia na kharakterystyky plavlennia ta horinnia parafinu / S. H. Orlovska // Fyzyka i khimiiia tverdoho tila. - 2015. - 16, № 4. - S. 747-750.
- 6.Aktan O. Yu. y dr. Fyzichni osnovy konstruiuvannia dyvhuna na parafinovomu palyvi dlia hibrydnykh raket. kinetyka plavlennia i horinnia //Kinetyka plavlennia i horinnia. Kosmichna nauka i tekhnolohiia. – 2011. – T. 17. – №. 3. – S. 28-33.
- 7.Orlovska S. H. Eksperymentalni doslidzhennia vyparovuvannia krapel parafiniv //Fyzyka aerodyspersnykh system. – 2022. – №. 60. – S. 187-193.
- 8.DSTU 4153-2003 Parafiny naftovi tverdi. Tekhnichni umovy. Z popravkoiu. Data pochatku dii, 01.01.2004. Data pryiniattia, 24.02.2003.
- 9.DSTU 7957-56 Hnity dlia hasovykh lamp.

Надійшла: 6.02.2023

Received: 6.02.2023

В.В. Дубровська¹, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0003-4765-0484В.І. Шкляр¹, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0001-6879-7501

Є.В. Гавриленко, магістр, ORCID 0009-0006-2962-6076

¹Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ГЕЛІОСИСТЕМ НА БАЗІ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛІВ ТА СОНЯЧНИХ КОЛЕКТОРІВ ДЛЯ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЮДЖЕТНИХ ОБ'ЄКТІВ

В даній статті проведено аналіз роботи геліосистеми в закладі вищої освіти, до складу якої входять фотоелектричні станції, що приєднані до електричної мережі з власним споживанням електроенергії, та сонячна установка гарячого водопостачання з колекторами та баком-акумулятором. Моделювання роботи системи проводилось в програмних середовищах RETScreen, T*SOL та PV*SOL на базі усереднених кліматичних даних отриманих з метеостанції «Жуляни». Розташування фотоелектричних модулів з монооксиду кремнію типу Trina Solar TSM-DE08M (II) потужністю 370 Вт та вакуумних трубчастих колекторів фірми Veissmann Vitosol 300-T SP3 потужністю 1,3 кВт проведено за допомогою моделювання з урахуванням їх розмірів, особливостей конструкції даху, розміщення вентиляційних систем, затінення поверхонь даху іншими елементами будівлі в м. Києві. В результаті енергетичного моделювання визначено: кількість отриманої теплової та електричної енергії, потужності інверторів, коефіцієнт заміщення традиційного палива, строки окупності та зменшення викидів шкідливих речовин (CO₂). Враховуючи аналіз отриманих даних в подальшому рекомендується встановлення таких систем в бюджетних закладах вищої освіти для зниження споживання електричної енергії або природного газу, зменшення шкідливих викидів в навколишнє середовище.

Ключові слова: фотоелектричні модулі, сонячний колектор, програмне забезпечення, енергетичне моделювання, ступінь заміщення палива, викиди CO₂.

Вступ. В останні роки Україна і інші держави світу починають стикатися з наслідками глобальної зміни клімату. Однією з причин глобального потепління є зростання викидів вуглекислого газу.

Основним джерелом викидів є використання викопного палива в традиційній енергетиці для виробництва теплової та електричної енергії. У зв'язку зі збільшенням тарифів на енергію та у відповідності до енергетичної Стратегії України [1], більш актуальним стає впровадження відновлювальних джерел енергії (ВДЕ) в бюджетних установах, що дозволить значно зменшити використання первинних енергетичних ресурсів. Щорічне подорожчання енергетичних ресурсів, невпинне зменшення покладів викопного палива та зростання забруднення навколишнього середовища призводить до збільшення частки використання поновлюваних джерел енергії в усьому світі.

Однією з перспективних альтернатив традиційним видам палива є енергетичний потенціал сонячної енергії, який може бути використаний для зменшення використовуваних об'ємів органічного палива при виробництві теплової та електричної енергії.

Сонячна радіація – це практично невичерпне та екологічно чисте джерело енергії, що дозволяє використовувати його у все більш зростаючих масштабах без негативного впливу на довкілля. Вона використовується для отримання теплоти в системах гарячого водопостачання шляхом прямої абсорбції сонячного випромінювання в сонячних колекторах та перетворення його на електричну енергію в фотоелектричних системах.

В середній смузі Європи в літній період квадратний метр плоского сонячного колектору забезпечує нагрівання 50-60 літрів води в день до температури 60-70 °С, а вакуумного – до 70-90 літрів.

ККД плоского сонячного колектору складає до 70%, а вакуумного до 92% та залежать від температури довкілля, густини потоку сонячної енергії і температури, до якої необхідно нагрівати воду в геліосистемі.

Одним з основних економічних показників сонячного колектору, поряд з його вартістю, є надійність та довговічність. Термін служби геліоколектору не менше 10 років.

Середньорічна кількість сумарної енергії сонячного випромінювання, що надходить щорічно на територію України, знаходиться в межах 1000-1400 кВт·год/м² [2]. Таку сонячну активність можна порівняти з умовами Німеччини, де дахових геліоустановок налічується майже в 1400 разів більше, ніж в Україні. Для збільшення частки сонячної енергії у загальному споживанні енергії у містах, Палата

депутатів Берліну [3] прийняла закон про обов'язковість встановлення сонячних модулів з 1 січня 2023 року на нові будівлі, а також у разі капітального ремонту дахів існуючих споруд.

Фотоенергетичне обладнання може експлуатуватися весь рік, проте максимально ефективно його використання з квітня до жовтня. При цьому найбільш сприятливими для цього є південні регіони України (Одеська, Миколаївська, Херсонська, Запорізька та частина Донецької області, АР Крим), де сьогодні зосереджено понад 60% промислових сонячних електростанцій. Станом на кінець 2021 року сумарна потужність сонячних електростанцій склала 6320 МВт (без урахування тих, що знаходяться на тимчасово окупованих територіях) [4]. В Україні розробляють нові сонячні електростанції малої потужності, щоб уникнути відключень електроенергії та допомогти бізнесу триматися на плаву в жахливих економічних умовах.

Вище викладене дає підставу вважати, що в Україні існують всі необхідні та достатні умови широкомасштабного впровадження геліосистем при виробництві теплової та електричної енергії для енергозабезпечення споживачів.

Мета та завдання. Аналіз зменшення споживання теплової та електричної енергії отриманих з традиційних видів палива та викидів CO₂ при використанні геліосистеми з використанням сонячних колекторів та фотоелектричних модулів на основі комп'ютерного моделювання.

Об'єктом дослідження обрано корпус №9 КПІ (рис. 1) [5], в якому навчається 918 студентів.

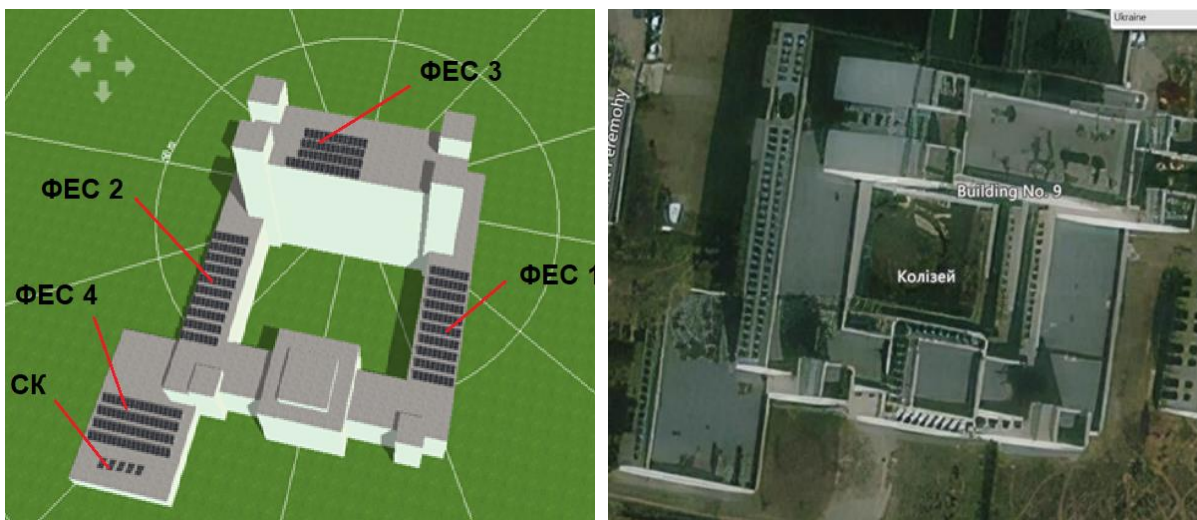


Рисунок 1 – Загальний вигляд корпусу № 9 та розміщення сонячних фотоелектричних модулів та колекторів: ФЕС 1-ФЕС 4 – фотоелектричні станції; СК – сонячні колектори

За рік корпусом споживається в середньому біля 200 МВт·год електричної енергії, яка витрачається на освітлення, електрообладнання та нагрівання води в електричних бойлерах. Графік споживання електроенергії протягом декількох років наведено на рисунку 2.

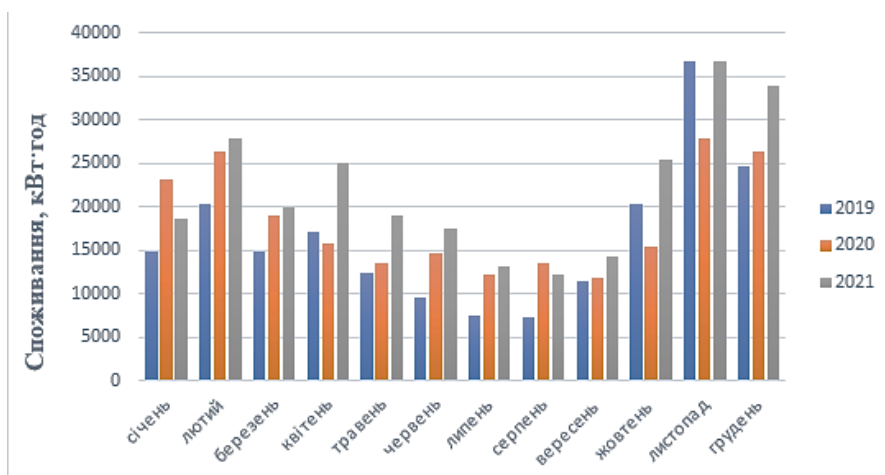
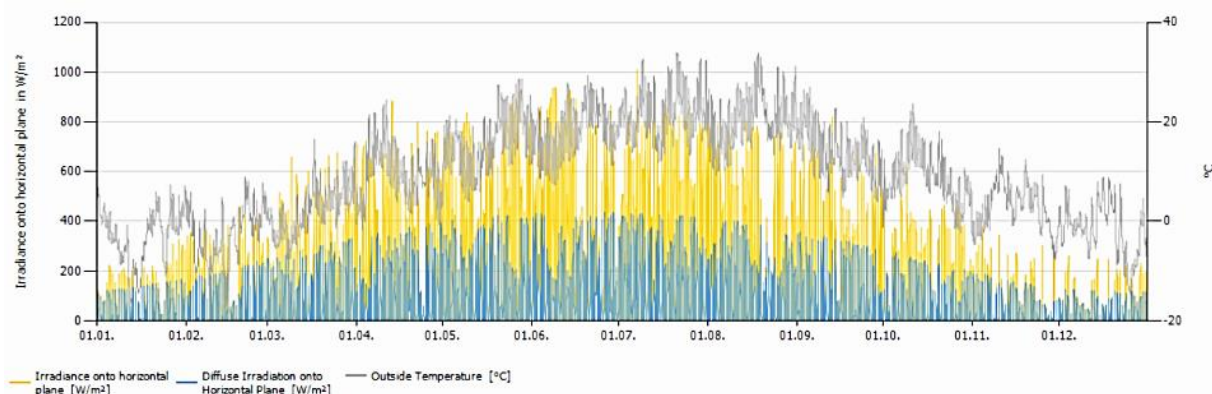


Рисунок 2 – Споживання електричної енергії корпусом №9 протягом 2019-2021 рр.

Для зменшення залежності від зовнішньої електромережі пропонується встановити на даху корпусу сонячні колектори (СК) для забезпечення потреб ідальні гарячою водою з середньоденним споживанням 1,2 м³, а для покриття електричного навантаження – чотири фотоелектричні станції (ФЕС), які розташовані на різних рівнях поверхні даху.

Для вирішення поставленої задачі було проведено комп'ютерне моделювання роботи геліосистеми в програмних середовищах RETScreen [6], T*SOL [7] та PV*SOL [8], які дозволили розрахувати отриману сонячну енергію, кількість виробленої електричної енергії та теплоти, коефіцієнт заміщення традиційного палива, строк окупності та зменшення викидів шкідливих речовин (CO₂).

Наведені програми використовують усереднені кліматичні дані для м. Київ, які були отримані з метеостанції «Жуляни» за останні 20 років (рис. 3).



а

Місяць	Температура повітря	Відносна вологість	Опади	Денна сума сонячної радіації - на горизонтальній поверхні		Атмосферний тиск	Швидкість вітру	Температура землі	Градусо-дні опалювального сезону 18 °C	Градусо-дні з від'ємною температурою 10 °C
	°C			%	мм					
Січень	-5,6	82,3%	38,13	0,79	100,0	3,5	-6,8	732	0	
Лютий	-4,2	78,9%	36,68	1,27	100,0	3,6	-5,6	622	0	
Березень	0,7	73,5%	39,68	2,56	99,8	3,6	0,3	536	0	
Квітень	8,7	66,1%	44,10	3,21	99,4	3,2	8,7	279	0	
Травень	15,1	63,1%	53,01	4,98	99,5	3,1	15,5	90	158	
Червень	18,2	69,5%	81,00	5,44	99,3	2,9	19,2	0	246	
Липень	19,3	69,7%	69,44	5,70	99,3	2,6	21,5	0	288	
Серпень	18,6	69,3%	56,11	4,62	99,5	2,6	20,6	0	267	
Вересень	13,9	75,2%	57,60	3,04	99,6	2,8	14,4	123	117	
Жовтень	8,1	78,3%	39,68	1,80	100,0	2,9	7,5	307	0	
Листопад	2,1	84,9%	45,90	0,73	99,9	3,2	0,5	477	0	
Грудень	-2,3	84,7%	43,71	0,58	99,8	3,4	-5,2	629	0	
Щорічний	7,8	74,6%	605,04	2,90	99,7	3,1	7,6	3 795	1 076	
Джерело	Грунтовий	Грунтовий	NASA	Грунтовий	Грунтовий	Грунтовий	NASA	Грунтовий	Грунтовий	
Виміряно в					м	10	0			

б

Рисунок 3 – Кліматичні дані з програми PV*SOL (а) та RETScreen (б)

Моделювання ФЕС проведено в програмах PV*SOL та RETScreen. Розміщення СБ виконано за допомогою 3D моделювання в програмі PV*SOL паралельними рядами з урахуванням їх розмірів, особливостей конструкції даху будівлі, розміщення вентиляційних систем та затінення поверхонь даху іншими елементами будівлі (рис. 1). При моделюванні використовувалась система Grid-connected PV System with Electrical Appliances - система, що приєднана до мережі з власним споживанням. Пропонується встановити однакові сонячні батареї (СБ) з монооксиду кремнію типу Trina Solar TSM-DE08M (II) [9] потужністю 370 Вт у чотирьох місцях під оптимальним кутом.

У програмі RETScreen, яка дозволяє моделювати та аналізувати будь-який проект із використанням ВДЕ, за максимальною кількістю надходження річної сонячної радіації на похилу поверхню, яка складає 4,6 МВт·год, було визначено оптимальний кут нахилу встановлення сонячного модуля у 30° при цілорічній роботі системи.

Характеристики ФЕС наведено в таблиці 1.

Для переведення електричної енергії постійного струму, яку виробляють фотоелектричні модулі, в змінний, було використано чотири трифазні інвертори різної потужності: 50 кВт для ФЕС 1 і ФЕС 3; 20 кВт – ФЕС 2; 17 кВт та 8 кВт – ФЕС 4. Вихідна напруга – 380 В. Кількість виробленої електричної енергії окремими ФЕС наведена на рисунку 4.

Таблиця 1 – Характеристики ФЕС

Система	Кількість, шт.	Площа, м ³	Встановлена пікова потужність, kWp	Річна кількість виробленої електричної енергії, кВт·год/рік	Ефективність роботи, %
ФЕС 1	80	146,68	29,60	31051	80,02
ФЕС 2	54	99,01	19,98	20507	78,29
ФЕС 3	80	146,68	29,60	30804	79,64
ФЕС 4	68	124,68	25,16	26798	80,72
Всього	282	517,05	104,34	109160	

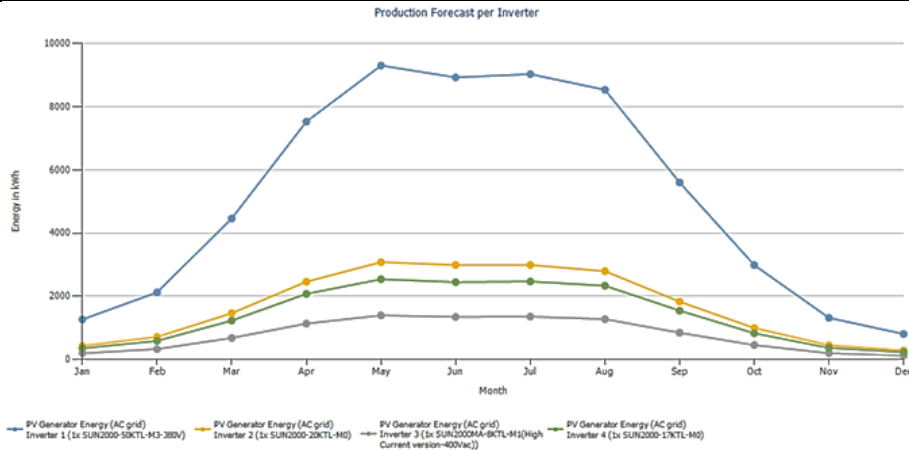


Рисунок 4 – Кількість виробленої електричної енергії ФЕС 1 – ФЕС 4

З рисунку 5 видно, що максимальну ефективність (найбільше виробляється електричної енергії) ФЕС мають з травня по серпень. Однак, не вся електроенергія, яка отримана в денний період, безпосередньо використовується в корпусі, частина її направляється в мережу (рис. 5). Забезпечення електрикою, при відсутності сонячного випромінювання або недостатньої її кількості від ФЕС, відбувається з мережі (рис. 6).

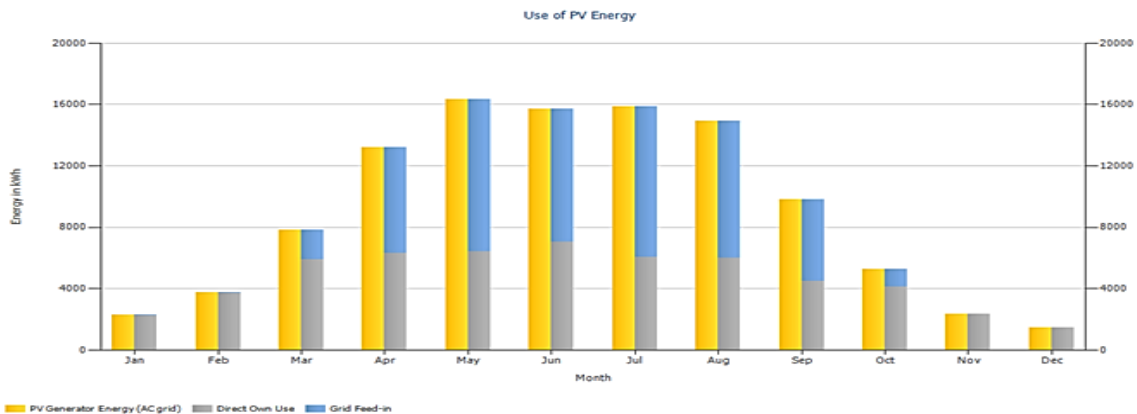


Рисунок 5 – Кількість виробленої електричної енергії ФЕС, спожитої та відданої в мережу

Баланс між виробництвом і споживанням електричної енергії та її перерозподіл з мережею наведено на рисунку 7.

В загальному балансі між споживачем та постачальником (рис. 7) в період з листопаду по лютий корпус потребує додаткової електрики з мережі, а з квітня по вересень навпаки передає її в мережу або іншим споживачам університету, які розташовані поруч. В березні та жовтні виробництво електричної енергії та її споживання майже однакові.

В результаті встановлення ФЕС може бути отримано 109,16 МВт·год електричної енергії, що складає близько 50 % від загальної річної потреби.

Програма PV*SOL визначає вартість обладнання системи та розраховує строк окупності. Фінансові витрати з програми PV*SOL дозволили визначити строк окупності в програмі RETScreen для тих самих систем. При вартості системи у 77,3 тис. \$ USA і сумарних щорічних витратах у 4 тис. \$ USA строк окупності з урахуванням вартості електричної енергії у 3,83 грн/кВт·год (з ПДВ та витратами на послуги з розподілу електричної енергії) склав 4,3 року в обох програмах.

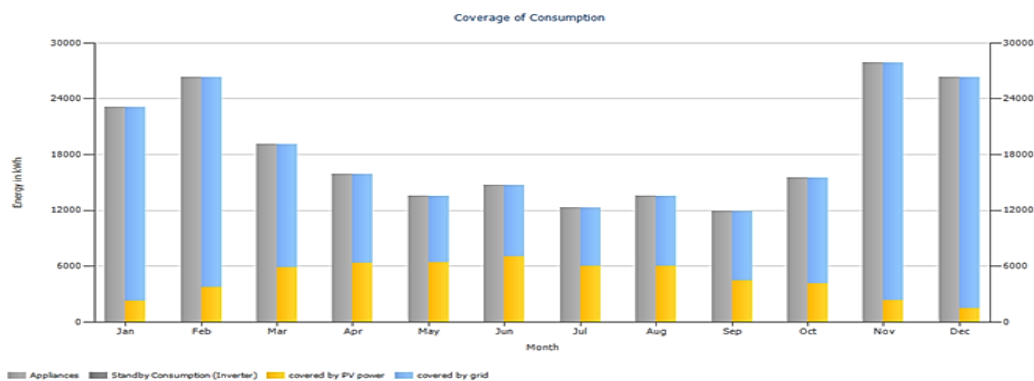


Рисунок 6 – Споживання електричної енергії від ФЕС та мережі

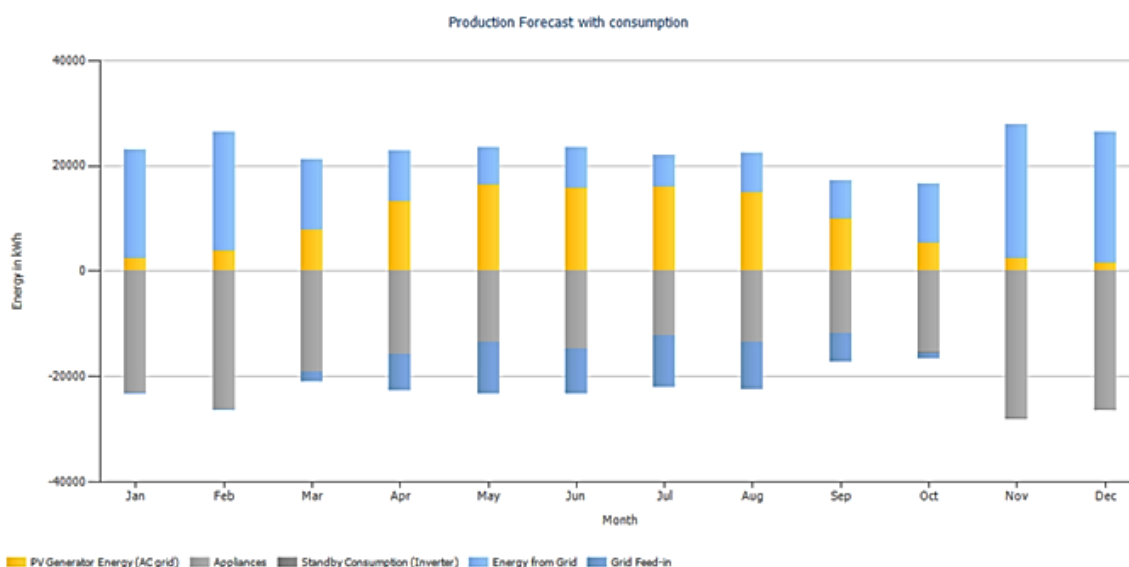


Рисунок 7 – Баланс виробництва і споживання електричної енергії та її перерозподіл з мережею

Програми RETScreen і T*SOL дозволяють проектувати та розраховувати сонячні системи для гарячого водопостачання та опалення з плоскими та вакуумними колекторами. В програмі T*SOL проводять динамічне річне моделювання системи ГВП з сонячними колекторами, розраховують температури теплоносіїв та теплоспоживання, з кроком від однієї до шести хвилин. Для порівняння результатів розрахунків в цих програмах було обрано сонячну систему ГВП з вакуумним трубчастим колектором і баком акумулятором, в якому розміщено додаткове електричне джерело теплоти. Характеристики колектору фірми Veissmann Vitosol 300-T SP3 [10] наведено в таблиці 2, а принципова схема установки – на рисунку 8. Вакуумні трубчасті колектори працюють за принципом "теплової труби" та мають тривалий термін експлуатації і функцію захисту від перегріву ThermProtect для підвищення експлуатаційної надійності. Вакуумні трубки з антивідбивного скла, високоефективна теплоізоляція з меламінової смоли в корпусі колектору та матеріали найвищої якості забезпечують високі показники потужності системи.

Таблиця 2 – Характеристики сонячного колектору

Кількість колекторів, шт.	5
Загальна площа, м ²	14,4
Площа абсорберів, м ²	10,77
Встановлена потужність, кВт	6,5
Об'єм баку акумулятора, м ³	1

Отримані результати моделювання в двох програмах мають незначну відмінність.

З розрахунків в програмі RETScreen встановлено, що розміщення сонячного колектору під оптимальним кутом нахилу в 35° при цілорічній роботі системи збільшує отриману середньорічну денну сонячну радіацію, яка надходить на поверхню СК, на 11 %, тобто з 2,9 кВт·год/(м²·день) для горизонтальної до 3,26 кВт·год/(м²·день) для похилої.

Коефіцієнт заміщення палива склав 75 %, тобто з необхідної для ГВП енергії у 8,9 МВт·год сонячною енергією заміщається 6,823 МВт·год, а електричною за рахунок вбудованого ТЕНу – 2,077 МВт·год (рис. 9).

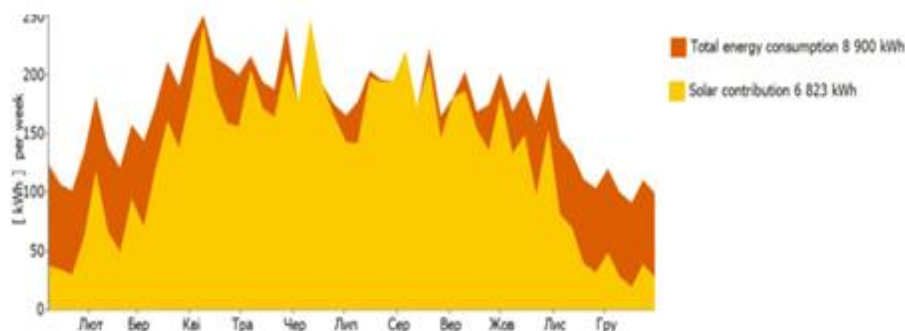


Рисунок 9 – Графік заміщення електричної енергії сонячною

При заміні електричного нагрівача на геліосистему з колектором простий строк окупності складатиме 13 років з урахуванням вартості електричної енергії 3,83 грн / кВт·год. При заміні гарячої води з системи централізованого теплопостачання (середня ціна 1 Гкал складає 2850 грн) – 16 років.

З залежності максимальної температури поверхні колекторів протягом року (рис. 10) видно, що її температура перевищує 100-150 °С, що може призвести до стагнації СК – перегріву проміжного теплоносія та зміни його фізичних властивостей. Таке підвищення температур пояснюється відсутністю споживання гарячої води в суботу та неділю, коли їдальня (основний споживач гарячої води) не працює.

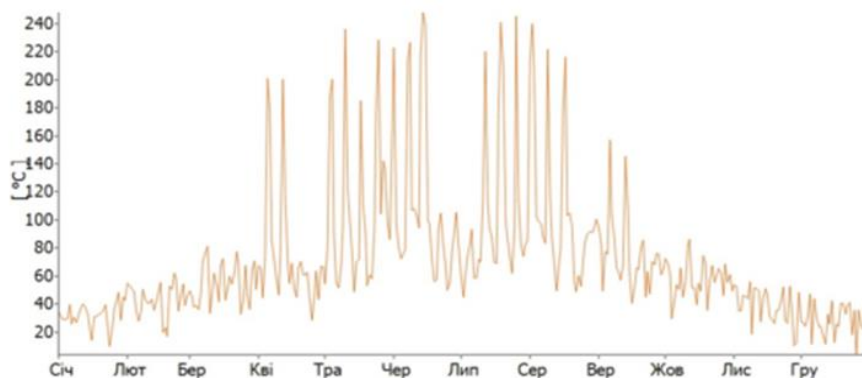


Рисунок 10 – Температури поверхні колекторів протягом року

Розрахунки показали, що встановлення геліосистем дозволяє зменшити річні викиди CO₂ на 45 т, що еквівалентно збереженню: 104,3 барелей сирової нафти або 19279 літрів високооктанового бензину, 15,5 т перероблених відходів чи 8 автомобілів, що не використовуються (табл. 3).

Забезпечення електрикою циркуляційних насосів та автоматики сонячної системи відбувається з фотоелектричної системи.

Таблиця 3 – Зменшення впливу на навколишнє середовище від встановлення сонячних систем

Назва	Одиниці виміру	СК	ФЕС
Річні викиди CO ₂ до встановлення сонячних систем	т	9,2	43,6
Річні викиди CO ₂ після встановлення сонячних систем	т	4,8	3
Сира нафта	барель	10,1	94,2
Високооктановий бензин	л	1875	17404
Перероблені відходи	т	1,5	14
Автомобілі, що не використовуються	шт.	0,8	7,4

Висновки. Встановлення активних сонячних систем гарячого водоприготування на базі високоефективних вакуумних трубчастих колекторів дозволить зменшити споживання теплової енергії на 6,823 МВт·год, а використання ФЕС – 109,16 МВт·год електричної енергії. Їх застосування зменшить шкідливі викиди CO₂ на 45 т в рік. Строк служби установок складає 25 років, а строки окупності для ФЕС становить 4,3 року, для системи ГВП 13 років при заміні електричних бойлерів або 16 років при отриманні гарячої води з теплової мережі. Отримані результати моделювання свідчать про доцільність використання геліосистем в бюджетних закладах вищої освіти.

Список використаної літератури

1. Енергетична стратегія України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність». Режим доступу: www.zakon.rada.gov.ua/signal/kr06145a.doc.
2. Кудря С. О. Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії. Підручник. Національний технічний університет України «КПІ». Київ, – 2012. – 495 с.
3. Німеччина: Не встановив сонячну батарею на даху? Плати штраф! Режим доступу: <http://www.golos.com.ua/article/347740>.
4. Галузь сонячної енергетики в Україні. Режим доступу: <https://www.ueex.com.ua/presscenter/news/galuz-sonyachnoi-energetiki-v-ukraini/>.
5. Карти Google. Режим доступу: <http://www.google.com.ua/maps/>.
6. Clean energy project analysis. RETScreen engineering & cases Textbook. 3rd edition Режим доступу: <http://www.retscreen.net/>.
7. Програмне середовище T* SOL. Режим доступу: <https://valentin-software.com/>.
8. Програмне середовище PV*SOL. Режим доступу: <https://valentin-software.com/>.
9. Сонячна панель Trina Solar TSM-DE08M (II). Режим доступу: <https://ecoforce.com.ua/ru/photoelectrics/tsm-de08m-375w/>.
10. Сонячний колектор Vitosol 300-T SP3. Режим доступу: <https://viessmann-atlant.com.ua/geliosistemy-viessmann/viessmann-vitosol-300-t-sp3b>.

V. Dubrovska¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0003-4765-0484

V. Shklyar¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0001-6879-7501

Y. Havrylenko¹, master, ORCID 0009-0006-2962-6076

¹National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

ANALYSIS OF THE EFFECTIVENESS OF USING SOLAR SYSTEMS BASED ON PHOTOVOLTAIC MODULES AND SOLAR COLLECTORS FOR ENERGY SUPPLY OF BUDGET FACILITIES

*This article analyzes the operation of a solar energy system installed in a higher education institution, consisting of four photovoltaic stations connected to the electrical grid for self-consumption, and a solar hot water system with collectors and a storage tank. The operation of the system was modeled using the RETScreen, T*SOL, and PV*SOL software programs, based on averaged climate data obtained from the "Zhuliany" weather station. The solar system is installed on the south-facing roof of the building and consists of 262 monocrystalline silicon photovoltaic modules of Trina Solar TSM-DE08M (II) type with a power of 370 W, installed at an angle of 30° to the horizon, and 8 Veissmann Vitosol 300-T SP3 vacuum tube collectors with a power of 1.3 kW installed at an angle of 35°. The placement of the solar elements was determined through modeling, considering their dimensions, the features of the roof structure, the placement of ventilation systems, and the shading of the roof surfaces by other elements of the building in Kyiv. As a result of energy modeling, it was determined that the amount of thermal energy obtained is 6.823 MWh/year, and the amount of electrical energy is -109.16 MWh/year, with a total inverter capacity of 95 kW, a traditional fuel replacement coefficient of 50% for the photovoltaic system and 75% for the solar system with collectors, payback periods of 4.3 years for the photovoltaic system, and 13 years for the hot water system when replacing electric boilers and 16 years when obtaining hot water from a district heating network. The reduction in harmful emissions is 45 tons/year of CO₂, which is equivalent to 104.3 barrels of crude oil or 19,279 liters of high-octane gasoline or 15.5 tons of recycled waste. Based on the analysis of the data, it is recommended to install such systems in higher education budget institutions to reduce electricity or natural gas consumption and reduce harmful emissions into the environment.*

Keywords: photovoltaic modules, solar collector, software, energy modeling, fuel substitution rate, CO₂ emissions.

References

1. Enerhetychna stratehiia Ukrainy na period do 2035 roku «Bezpeka, enerhoefektyvnist, konkurentospromozhnist». URL: www.zakon.rada.gov.ua/signal/kr06145a.doc.
2. Kudria S. O. Netradytsiini ta vidnovliuvani dzherela enerhii . Pidruchnyk. Natsionalnyi tekhnichniy universytet Ukrainy «KPI». Kyiv, – 2012. – 495 s.
3. Nimechchyna: Ne vstanovyv soniachnu batareiu na dakhu? Platy shtraf! URL: <http://www.golos.com.ua/article/347740>
4. Haluz soniachnoi enerhetyky v Ukraini. URL: <https://www.ueex.com.ua/presscenter/news/galuz-sonyachnoi-energetiki-v-ukraini/>
5. Karty Google. URL: <http://www.google.com.ua/maps/>.
6. Clean energy project analysis. RETScreen engineering & cases Textbook. 3rd edition URL: <http://www.retscreen.net/>.
7. Prohramne seredovyshche T* SOL. URL: <https://valentin-software.com/>.
8. Prohramne seredovyshche PV*SOL. URL: <https://valentin-software.com/>
9. Soniachna panel Trina Solar TSM-DE08M (II) URL: <https://ecoforce.com.ua/ru/photoelectrics/tsm-de08m-375w/>
10. Soniachnyi kolektor Vitosol 300-T SP3 URL: <https://viessmann-atlant.com.ua/geliosistemy-viessmann-vitosol-300-t-sp3b>

Надійшла: 13.03.2023

Received: 13.03.2023

ЕНЕРГОМЕНЕДЖМЕНТ ЯК ГОЛОВНИЙ ЧИННИК РОЗВИТКУ СУЧАСНОГО УНІВЕРСИТЕТУ

Проаналізовано сучасний стан енергоефективності споживання різних видів енергоносіїв в різних галузях господарювання України. При аналізі визначено фактори, що впливають на зменшення споживання енергоресурсів закладів вищої освіти на прикладі Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серед основних, що потребують дослідження, можна виділити, насамперед, недостатню увагу до питань стимулювання енергоефективності, застаріле обладнання та низьку кваліфікацію обслуговуючого персоналу.

За результатами досліджень визначено пріоритетні напрямки зниження втрат тепла та вивчається система опалення шляхом покращення теплофізичних характеристик огорожувальних конструкцій будівель, впровадження теплових екранів для радіаторів, нарешті, розробки та впровадження автоматизованих систем. для реєстрації та контролю надходження теплоносія до теплових пунктів.

Розроблено рекомендації з підвищення якості енергозабезпечення, енергоощадності та енергоефективності в НУБіП України, які сприятимуть підвищенню ефективності виробничої діяльності підприємств, де внаслідок зношеності діючого обладнання втрачається до 30 % енергетичних ресурсів

Ключові слова: енергоефективність, енергоспоживання, система, управління, енергоресурси, кошти, втрати, економія

Вступ

У сучасному світі наявність та доступність до паливно-енергетичних ресурсів, безперебійність їх постачання та ефективність використання багато в чому визначають стійкість і темпи розвитку країни. В цьому поступі Україна не є винятком, враховуючи ситуацію, яка є в країні, забезпеченням енергоресурсами стає все більш проблематичною, а її сьогоденні рішення можуть впливати на швидкість та якість розвитку в майбутньому [1, 2].

Наразі українська промисловість та побутова сфера є надзвичайно енергоємними, вони у великій мірі залежать від джерел енергії, в першу чергу, нафти і газ, які отримано з-за кордону. Це в свою чергу, впливає на рівень цін на енергоресурси і відображається на економічному стані різних галузей господарювання в т.ч. і на житлово-побутовій сфері і як наслідок, на рівні життя людей, які вимушені з кожним роком платити все більше і більше за опалення та комунальні послуги [2, 3]. Це стосується і державних закладів вищої освіти.

Так, за [даними](#) Міжнародної енергетичної асоціації, у 2017 році аби згенерувати \$1 ВВП Україна витратила кількість енергії, що дорівнює 0,27 кг нафтового еквіваленту. При цьому Україна має величезний потенціал до енергозбереження та енергоефективності [1].

В той же час, ЄС залишиться провідним центром впровадження енергоефективності. У той же час деякі держави Європейського Союзу уже створили свої національні стратегії в області енергозбереження, це насамперед відбувається внаслідок стимулювання кредитами і податковими пільгами на впровадження енергозберігаючих технологій. Фактично на цьому і заснована національна система із енергозбереження провідних країн світу, наприклад Німеччини, Італії, Великобританії, Японії, Канади, Нідерландів, США, Франції, Південної Кореї тощо [4].

Так, наприклад, у Німеччині, яка є світовим лідером із впровадження енергоефективних заходів, відбувається повна мобілізація інвестицій для оновлення національного фонду нерухомості. У Франції розроблено та впроваджено найбільші інноваційні програми модернізації будівель в світі, а у Японії основним органом, який встановлює та впроваджує основні принципи політики в сфері енергозбереження є Міністерство економіки, торгівлі та промисловості.

Україна у світлі реалізації Угоди про асоціацію з ЄС і у зв'язку із підвищенням необхідності енергетичної безпеки, напрям, який стосується енергозбереження поставило одним із пріоритетних питань для розвитку нашої держави [5, 6].

Мета та завдання

Метою дослідження є скорочення витрат на опалення у громадських та навчально-виробничих будівель закладів вищої освіти

Для досягнення поставленої мети були розроблені наступні задачі:

- встановити взаємозв'язок впливу різних факторів на обсяги споживання енергоресурсів та визначити можливість зменшення їх втрат;
- розробити рекомендації щодо термомодернізації навчально-виробничих будівель закладів освіти і їх оснащення індивідуальними модульними тепловими пунктами

Матеріал та результати досліджень

Сьогодні управління енергоефективністю в Національному університеті біоресурсів і природокористування України (НУБіП України) є одним із найважливіших напрямів господарської діяльності [7, 8]. Розвивати енергетичну свідомість у молоді можна лише на реальних прикладах підвищення енергоефективності.

НУБіП України, як господарюючий суб'єкт, поступово стає базовим інноваційним майданчиком для поширення досвіду і кращих практик енергозбереження для виховання і підготовки сучасного покоління молодих фахівців, для яких осядає ставлення до споживання енергоресурсів буде покладене в основу професійної і суспільної діяльності.

Ефективне використання енергоресурсів неможливе без дотримання певних стратегічних засад розвитку енергогосподарства університету. Базові положення такої стратегії відображені у Програмі розвитку НУБіП України «Голосіївська ініціатива – 2025», а практичний інструментарій її реалізації сформульований у «Комплексній науково-технічній програмі управління енергоефективністю в НУБіП України на 2021 – 2025 рр.» [9].

Значне підвищення тарифів на енергоносії у 2013 році створило значні проблеми у бюджетуванні видатків на енергозабезпечення університету, тому університет включився у роботу з розроблення проектно-кошторисної документації і виконав термомодернізацію будівель навчальних корпусів та студентських гуртожитків шляхом залучення грантових інвестицій. Так, на даний час уже завершено термомодернізацію 10 навчальних корпусів та частково 5 студентських гуртожитків.

Університет вже декілька років поспіль розробляє та впроваджує організаційні та техніко-технологічні заходи щодо зменшення рівнів енергоспоживання і формує нове середовище для прийняття ефективних управлінських рішень для стимулювання енергозбереження за рахунок впровадження сучасної системи управління енергетичним господарством університету.

На першому етапі були розроблені програмні документи [9] для впровадження системи управління енергоспоживанням на основі аналізу даних у режимі реального часу (рис. 1), виконані енергоаудити та енергообстеження будівель університету у відповідності до чинних нормативних документів [10]. Найвні дані в подальшому були використанні для визначення прогнозованих показників техніко-економічних обґрунтувань майбутніх проектів.

За період 2014 – 2022 рр. в університеті сформована цілісна система енергоменеджменту, на базі ННІ енергетики, автоматики і енергозбереження створений центр енергоефективності, який став для інженерних служб та керівників структурних підрозділів своєрідним фаховим підрозділом для моніторингу енерго- та водоспоживання, регулювання режимів теплових пунктів, техніко-економічних обґрунтувань пропонування заходів тощо [11, 12].

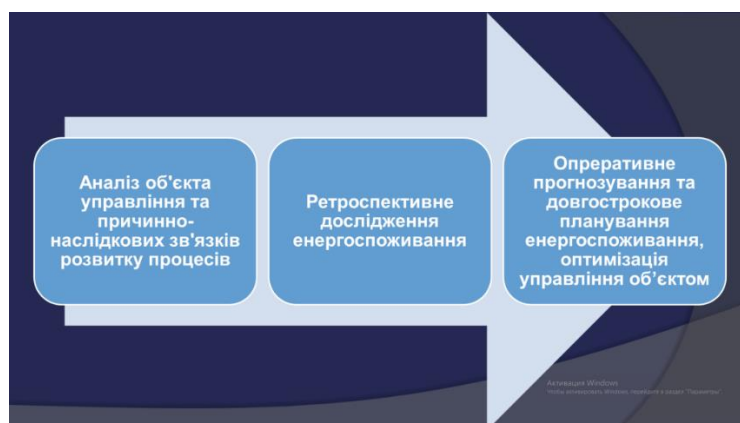


Рисунок 1 – Структурна схема управління енергоспоживанням

Завданням першого етапу було визначення загального існуючого та перспективного потенціалу енергозбереження, розроблення і обґрунтування першочергових та перспективних заходів з підвищення енергоефективності.

Найперші кроки стосувались встановлення в усіх будівлях сучасних вузлів обліку для енергоносіїв і води, встановлені сучасні теплові пункти з погодозалежним регулюванням подачі теплоносія, що дало

змогу виявити випадки нераціонального використання енергоносіїв та адаптивно управляти енерго- та водоспоживанням (в залежності від сезону, навчального періоду, у вихідні та святкові дні, температури навколишнього середовища, часу доби тощо) (рис. 2).

З 2015 року в університеті почалась поетапна реконструкція теплових пунктів навчальних корпусів із застосуванням внутрішніх циркуляційних насосів, регулюючих клапанів, гідравлічних регуляторів тиску і теплообмінників, які забезпечують ефективне регулювання та балансування теплової потужності [12, 13].

Паралельно налагоджувалась конструктивна співпраця компаніями-постачальниками електричної та теплової енергії щодо врегулювання питань застосування тарифів у гуртожитках, що привело до значного зменшення фінансових витрат університету. Внесені технічні зміни в систему комерційного обліку та умови застосування договірних тарифів, що дало змогу зменшити фінансове навантаження на бюджет університету більше ніж 700 тис грн в рік. Сьогодні вже встановлені на всі бойлерні вузли обліку гарячої води, які дають можливість обліковувати тільки фактично спожиту теплоенергію. На стадії завершення розробка проекту системи автоматизованого комерційного обліку електроенергії з модернізацією схем обліку, виконаний пілотний проект інсталяції програмного забезпечення для АСКОЕ НУБіП України, впроваджена методика нормування лімітів споживання енергоносіїв та постійно здійснюється моніторинг за їх використанням.



Рисунок 2 – Структурна схема диспетчеризації системи обліку енергоресурсів

Показовими щодо оцінювання ефективності діяльності є ретроспективні дані про споживання та видатки коштів за енергоносії і воду в університеті впродовж 2016 – 2022 років (табл. 1). Вони свідчать, що внутрішні інженерні системи енергоспоживання, будівлі навчальних корпусів та гуртожитків ще містять значний практичний потенціал енергозбереження (рис. 3 – 5) [13].

Таблиця 1 – Витрати коштів за споживання енергоресурсів та води в університеті у 2016 – 2022 рр., тис грн

Вид послуги	Фактично сплачено коштів за чинними тарифами, тис грн						
	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022 (прогноз)
Теплоспоживання	16105	11676	16609	14103	11407	16520	22251
Гаряча вода	6960	6583	4712	6160	4536	5249	7292
Водоспоживання	3271	3417	3552	4915	4330	4582	6281
Електроспоживання	11585	10299	10757	10954	7881	13313	21700
Споживання газу	2334	1531	1980	1483	863	1108	2510
ВСЬОГО:	40256	33507	37612	37616	29019	40772	60034

Сьогодні в університеті функціонує служба енергоменеджменту на основі нормування енерго- та водоспоживання у будівлях, впроваджується спеціалізоване програмно-технічне забезпечення для управління енерго- та водоспоживанням, створена система мотивацій для співробітників.

За час дії програми енергозбереження в НУБіП України у 2017 – 2022 рр. сумарний економічний ефект у приведених базового 2014 року тарифах на енергоносії і воду склав 89,76 млн грн [13].

Подальша реалізація програми передбачає впровадження автоматизованих програмно-технічних комплексів для управління режимами енергоспоживання та оцінювання економічної ефективності впровадження заходів з енергозбереження в умовах університету. Потенціал економії в університеті ще не вичерпаний, і може бути не менше 30 – 40 %.

Особливо гостро стає питання енергоефективності з підвищенням тарифів на енергоносії у майбутньому, коли оплата за енергоносії може вирости більше ніж на 50 %.



Рисунок 3 – Динаміка споживання енергоресурсів в НУБіП України



Рисунок 4 – Динаміка споживання енергоносіїв теплоспоживання) 2016 – 2022 рр.



Рисунок 5 – Динаміка оплати енергоносіїв у 2014-2021 рр. та прогноз на 2022р

Ректор університету Ніколасенко С. постійно наголошує: «Енергозбереження – це не тільки економічний ефект, але має важливе виховне значення для студентів та мотиваційний стимул для співробітників». При цьому з гордістю посилається на досвід, набутий в університеті.

Енергоефективність повинна стати своєрідним критерієм якості функціонування загалом університетського господарства, злагодженої взаємодії між інженерними службами, керівниками структурних та відокремлених підрозділів, співробітниками і студентами.

Висновки

1. Проведені дослідження показують на необхідність розробки системного, державного підходу до ефективного використання енергоресурсів в житлово-комунальній сфері, як одного із важливих показників розвитку економіки.

2. Запропоновано заходи з енергозбереження, які сприятимуть підвищенню ефективності виробничої діяльності підприємств, де внаслідок зношення експлуатаційного обладнання втрачається до 35 – 40 % енергоресурсів. При цьому процес раціонального споживання енергоресурсів доцільно розглядати в межах функціонування системи енергетичного менеджменту підприємства.

3. Розроблені організаційно-економічні рекомендації з підвищення якості енергозабезпечення, енергоощадності та енергоефективності в НУБіП України, що включають в себе заходи із покращення ефективності використання енергоресурсів, дозволили скоротити їх споживання на 30 %

Список використаної літератури

1. Енергетична стратегія України на період до 2035 року. Міністерство енергетики та вугільної промисловості України.

URL: http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/publish/article?art_id=245239564& cat_id=245239555.

2. Майсснер Ф. Підвищення енергоефективності в Україні: зменшення регулювання та стимулювання енергозбереження / Ф. Майсснер, Д. Науменко, Й. Радеке // Інститут економічних досліджень та політичних консультацій. Берлін / Київ, 2012 р. [Електронний ресурс] – Режим доступу:

http://www.ier.com.ua/files/publications/Policy_papers/German_advisory_group/2012/PP_01_2012_ukr.pdf

3. Праховник А.В., Калинин В.П., Эпель П.Я. К управлению электропотреблением в условиях дефицита энергоресурсов // Изв. ВУЗов СССР. Энергетика. – 1986. – № 10. С.11 – 15.

4. Rocha P., Siddiquia A., Stadlercd M. Improving energy efficiency via smart building energy management systems: A comparison with policy measures / Energy and Buildings. Vol. 88, 1 February 2015, P. 203 – 213.

5. ISO 50006:2016 (ISO 50006:2014, IDT). Energy management systems. Measuring the level of achieved / achievable energy efficiency using basic levels of energy consumption and energy efficiency indicators. General provisions and guidelines.

6. Про енергетичну ефективність: Закон України від 17 груд. 2020 р. №4507.

URL: http://w1.c1.rada.gov.ua/pls/zweb2/webproc4_1?pf3511=70687.

7. Иноземцев Г.Б., Козирский В.В, Окушко О.В. (2016). Методи енергозбереження в системах електропостачання: Навч. посібник / К.: ЦП «Компринт».

8. Радко І. П. Підвищення заходів з енергоефективності та енергозбереження у вищих навчальних закладах / І. П. Радко, В. А. Наливайко, О. В. Окушко, А. В. Міщенко, Є. О. Антипов // Науковий вісник НУБіП України. – 2018. – № 283. – С. 275 – 280.

9. Каплун В.В. Комплекс заходів з енергозбереження в НУБіП України / Каплун В.В., Радко І.П., Наливайко В.А., Міщенко А.В., Окушко О.В., Антипов Є.О. за автор. ред. Радко І.П. / – К.: «Видавничий центр НУБіП України, 2021. – 104 с.

10. Козирський В.В. Результати спрощеного енергоаудиту об'єктів НУБіП України: [електронний ресурс] / [Козирський В.В., Берега О.М., Шеліманова О.В., Антипов Є.О.] // Енергетика і автоматика, 2012. – С 55 – 65.

Режим доступу: http://www.nbu.gov.ua/old_jrn/e-journals/eia/2012_1/12kvvonu.pdf.

11. Радко І.П., Лут М.Т., Наливайко В.А., Окушко О.В. Розробка проекту теплового пункту навчального корпусу НУБіП України / Енергетика і автоматика, 2018, №3, 86 – 94.

12. Жильцов А.В. Автоматизовані модульні теплові пункти для систем теплопостачання ВНЗ [Монографія] / А.В. Жильцов, М.Т. Лут, В.А. Наливайко, І.П. Радко, А.В. Міщенко, Є.О. Антипов, О.В. Окушко / К.: «Видавничий центр НУБіП України, 2021. – 365 с

13. Nalyvaiko V. Investigation of Termomodernized Building's Microclimate with Renewable Energy [Text] / Nalyvaiko V., Radko, I., Zhylytsov A., Okushko O., Mishchenko A., Antypov I. // E3S Web of Conferences 154,07011, 2020.

14. Nalyvaiko, V. Research of roof solar power plant in hot water supply installations / Nalyvaiko, V., Radko I., Okushko O., Bereziuk A., Antypov I., Mrachkovska N. // Przegląd Elektrotechniczny, 2023, 99(4), pp. 98–101

О. Okushko¹, канд. техн. наук, доц., ORCID 0000-0002-1894-5294

V. Nalyvaiko¹, канд. техн. наук, доц., ORCID 0000-0002-6297-9045

I. Radko¹, канд. техн. наук, доц., ORCID 0000-0002-4235-3969

¹National university of life and environmental sciences of Ukraine

ENERGY MANAGEMENT AS THE MAIN FACTOR IN THE DEVELOPMENT OF A MODERN UNIVERSITY

The current state of energy efficiency in the consumption of various types of energy carriers in various branches of the economy of Ukraine is analyzed. During the analysis, the factors affecting the reduction of energy

consumption of higher education institutions were identified, using the example of the National University of Bioresources and Nature Management of Ukraine. Among the main ones that require research, we can single out, first of all, insufficient attention to the issues of energy efficiency promotion, outdated equipment and low qualification of service personnel.

According to the results of the research, the priority directions for reducing heat loss are determined and the heating system is studied by improving the thermophysical characteristics of the enclosing structures of buildings, the introduction of thermal screens for radiators, and finally, the development and implementation of automated systems for registration and control of the flow of coolant to heating stations.

Recommendations have been developed to improve the quality of energy supply, energy saving and energy efficiency in NUBiP of Ukraine, which will contribute to increasing the efficiency of production activities of enterprises where up to 30% of energy resources are lost due to wear and tear of operating equipment

Key words: energy efficiency, energy consumption, system, management, energy resources, funds, losses, savings

References

1. Ministerstvo enerhetyky ta vuhilnoi promyslovosti Ukrainy. (2017). Enerhetychna stratehiia Ukrainy na period do 2035 roku [Energy strategy of Ukraine for the period until 2035]. URL: http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/publish/article?art_id=245239564&cat_id=245239555
2. Maissner, F. Naumenko, D., Radeke Y. (2012). Pidvyshchennia enerhoefektyvnosti v Ukraini: zmeshennia rehuliuвання ta stymuliuвання enerhozberezhennia [Increasing energy efficiency in Ukraine: reducing regulation and encouraging energy conservation]. URL: http://www.ier.com.ua/files/publications/Policy_papers/German_advisory_group/2012/PP_01_2012_ukr.pdf
3. Prakhovnyk A.V., Kalynchuk V.P., Эkel P.Ia. (1986). K upravleniyu elektropotreblenyem v usloviakh defytsyta enerhoresursov [Towards power consumption management in conditions of energy shortage], Yzv. VU3ov USSR. Enerhetyka, № 10, 11 – 15.
4. Rocha, P., Siddiquia, A., Stadlercd, M. (2015). Improving energy efficiency via smart building energy management systems: A comparison with policy measures, Energy and Buildings, Vol. 88, 1 February, 203 – 213.
5. ISO 50006:2016 (ISO 50006:2014, IDT). Energy management systems. Measuring the level of achieved / achievable energy efficiency using basic levels of energy consumption and energy efficiency indicators. General provisions and guidelines.
6. Zakon Ukrainy «Pro enerhetychnu efektyvnist». (2020). URL: http://w1.c1.rada.gov.ua/pls/zweb2/webproc4_1?pf3511=70687
7. Inozemtsev, H.B., Kozyrskyi, V.V., Okushko, O.V. (2016). Metody enerhozberezhennia v systemakh elektropostachannia [Methods of energy saving in power supply systems]. Kyiv, TsP «Kompynt», 160.
8. Radko, I.P., Nalyvaiko, V.A., Okushko, O.V., Mishchenko, A.V., Antypov, Ye.O. (2018). Pidvyshchennia zakhodiv z enerhoefektyvnosti ta enerhozberezhennia u vyshchylkh navchalnykh zakladakh [Increasing energy efficiency and energy saving measures in higher education institutions], Naukovyi visnyk NUBiP Ukrainy, № 283, 275 – 280.
9. Kaplun, V.V., Radko, I.P., Nalyvaiko, V.A., Mishchenko, A.V., Okushko, O.V., Antypov, Ye.O. (2021). Kompleks zakhodiv z enerhozberezhennia v NUBiP Ukrainy [A complex of energy-saving measures in NUBiP of Ukraine], Kyiv, Vydavnychiy tsentr NUBiP Ukrainy, 104.
10. Radko, I.P., Lut, M.T., Nalyvaiko, V.A., Okushko, O.V. (2018). Rozrobka proektu teplovoho punktu navchalnoho korpusu NUBiP Ukrainy [Development of the project of the thermal unit of the educational building of the National Academy of Sciences of Ukraine], Enerhetyka i avtomatyka, №3, 86 – 94.
11. Zhylytsov, A.V., Lut, M.T., Radko, I.P., Nalyvaiko, V.A., Mishchenko, A.V., Okushko, O.V., Antypov, Ye.O. (2021). Avtomatyzovani modulni teplovi punkty dlia system teplopostachannia VNZ [Automated modular heat points for heat supply systems of universities], Kyiv, Vydavnychiy tsentr NUBiP Ukrainy, 365.
12. Radko, I.P., Nalyvaiko, V.A., Okushko, O.V. (2019). Pidvyshchennia enerhoefektyvnosti system teplopostachannia v navchalnykh zakladakh [Increasing the energy efficiency of heat supply systems in educational institutions], Naukovyi visnyk TDAU, №9 (1).
13. Nalyvaiko, V.A., Radko, I.P., Zhylytsov, A.V., Mishchenko, A.V., Okushko, O.V., Antypov, Ye.O. (2020). Investigation of Termomodernized Building's Microclimate with Renewable Energy. E3S Web of Conferences 154,07011.
14. Nalyvaiko, V., Radko I., Okushko O., Bereziuk A., Antypov I., Mrachkovska N. (2023). Research of roof solar power plant in hot water supply installations. Przegląd Elektrotechniczny, 99(4), pp. 98–101.

Надійшла: 30.01.2023

Received: 30.01.2023

ДОСЛІДЖЕННЯ ІНТЕНСИВНОСТІ ТЕПЛООБМІНУ ТА АЕРОДИНАМІЧНОГО ОПОРУ ВСЕРЕДИНИ ПЛОСКОЇ ТРУБИ

Відомо, що теплообмінна труба плоскоовального профілю має відмінні теплоаеродинамічні характеристики на відміну від круглої труби. Так, при однакових площинах, плоска труба має суттєвий приріст теплоаеродинамічної ефективності у порівнянні з широко застосовуваною у промисловості круглою. Однак, на теперішній час існує обмежена кількість публікацій з дослідження теплообміну і аеродинаміки всередині плоскої труби.

У даній статті наведені методика і результати досліджень теплообміну і аеродинамічного опору в трубі, і представлений опис експериментального стенду для проведення таких досліджень.

Експерименти виконані в проточній аеродинамічній трубі внутрішнім діаметром 36 мм, що працює за відкритою розімкненою схемою. В якості робочого середовища використовується повітря, що всмоктується з лабораторного приміщення. Дослідним зразком виступала сталеві труба плоскоовального профілю довжиною 320 мм, поперечним перерізом 30x15 мм, товщиною стінки 2 мм.

Створений експериментальний стенд дозволяє досліджувати теплообмін і аеродинамічний опір плоскої труби при граничній умові $q=const$. Ця умова забезпечувалась електронагрівником, який являє собою намотаний на всю довжину труби ніхромовий дріт діаметром 0,6 мм і теплоізолюваний від зовнішнього середовища.

Досліди проводилися в діапазоні чисел Рейнольдса (10,5 – 55,0) 10^3 і розсіюваних потужностей (50 – 150) Вт, середня температура повітря в трубі встановлювалася в діапазоні (20 – 55) °С, а середня температура стінки труби - в інтервалі (24 – 140) °С у відповідності до електропотужності, що подавалася на нагрівач.

Запропоновані емпіричні кореляції для визначення інтенсивності теплообміну та аеродинамічного опору всередині плоскої труби. Виконано зіставлення даних з круглою трубою. Проведений аналіз результатів, вперше показано, що інтенсивність теплообміну і аеродинамічного опору в плоскоовальній трубі вище, відповідно, у 1,1 – 1,2 рази і у 1,4 -1,7 рази.

Ключові слова: *плоска труба, інтенсивність теплообміну, аеродинамічний опір, інтенсифікатор.*

Вступ. Останнім часом у зв'язку з постійно зростаючими цінами на енергоносії важливе значення надається ефективності виробництва та споживання енергії, а також технологіям енергозбереження. Найпоширенішим рішенням у цій сфері є впровадження різних теплообмінних пристроїв, таких, як, котли-утилізатори, рекуператори, підігрівачі відпрацьованих газів. Цілком природно, що вимоги до такого нового теплообмінного обладнання аналогічні вимогам, як і до основного теплоенергетичного обладнання, а саме: висока ефективність, надійність, безпека, тощо.

Крім того, проектування сучасних компактних теплообмінних апаратів і підвищення їх ефективності неможливе без вирішення актуальної проблеми інтенсифікації теплообміну. Зі збільшенням потужностей теплоенергетичного обладнання, помітно зростають масогабаритні характеристики теплообмінників. Задача зменшення їх об'єму та маси, підтримування стабільного температурного рівня елементів обладнання за допомогою інтенсифікації процесів теплообміну є дуже важливим напрямком у ресурсозбереженні, бо забезпечує значну економію металу на виготовлення теплообмінного устаткування. При розробці та дослідженні нових теплообмінних апаратів, як правило, намагаються досягнути високої інтенсивності теплопередачі при мінімальній витраті енергії на прокачування теплоносіїв, що впливає на експлуатаційні витрати. Так, для рідинних теплообмінників витрати електроенергії на подолання тертя та опору (енергія циркуляційного потоку), що виникають під час руху потоку через теплообмінник, зазвичай незначні порівняно з відповідною теплопередачею. При цьому, вплив споживаної потужності на компенсацію тертя і опору рідко є вирішальним та суттєвим фактором. Але для теплообмінників з газоподібними середовищами витрата механічної енергії на подолання тертя може досить легко досягати значень, порівнянних з величиною теплопередачі. Тому при такому підході слід пам'ятати, що на більшості промислових підприємств «вартість» механічної енергії в декілька разів (зазвичай у 3-5) «дорожча», ніж еквівалентна теплова енергія [1].

Мета та завдання. Метою є розробка експериментального стенду для дослідження теплообміну і аеродинамічного опору всередині труби плоскоовального профілю і отримання відповідних емпіричних залежностей.

Матеріали досліджень. Інтенсифікація теплообміну в трубах/каналах є ефективним способом вирішення проблеми зменшення габаритних розмірів та металоемності теплообмінних апаратів.

При перебігу однофазних теплоносіїв усередині труб/каналів широко застосовуються різні пристрої, що інтенсифікують теплообмінний процес, до них можна віднести: турбулізатори потоку, пристінні вихрогенератори, шнекові і стрічкові завихрювачі, встановлені на вході в канал, внутрішні ребра і т.д. [2-15].

Багато дослідників проводили дослідження впливу різних конструктивних способів посилення теплопередачі на підвищення теплової продуктивності в системі теплообмінника, як експериментальними, так і числовими методами. Певна кількість досліджень теплової поведінки використання турбулізаторів з різною геометрією, вставлених у круглі труби широко представлені в літературі, наприклад, кручені/спіральні стрічки [2-4], дровові котушки [5-7], вихрові кільця [8-11].

Вплив скручених стрічок із змінною довжиною і з різним ступенем скручування 0,5, 1,0, 1,5 та 2,0, спрямоване на підвищення теплопередачі в трубчастому теплообміннику, було досліджено Eiamsa-ard та ін. [2]. Chang та ін. [3] досліджували коефіцієнти падіння тиску та поздовжній розподіл теплопередачі в круглій трубі, в яку вставлені відокремлені частини скрученої стрічки з коефіцієнтами кручення 1, 1,5, 2, 2,5 або \square . Дані про вплив на підвищення теплопередачі, встановленої на всю довжину труби спіральної стрічки, яка має рівномірний крок навивки з центрованим стрижнем і без нього, приведені в Eiamsa-ard і Promvong [4].

Keklikcioglu і Ozceyhan в [5] використовували спіраль дроту з поперечним трикутним перерізом, встановленим всередину круглої труби, і вивчали вплив відносного кроку та відносної довжини сторони трикутника перерізу на передачу теплоти. Chang та ін. [6] провели експериментальне дослідження теплових характеристик труби, в яку вставлено гладкі дровові котушки (пружини), дровові котушки з ребрами 90°, канавками 90°, ребрами 45°, канавками 45°, ребрами 90° та канавками 90°, ребрами 45° та канавками 45°, кожна конфігурація дровової котушки була з п'ятьма різними коефіцієнтами кроку 0,5, 1, 1,5, 2 і 2,5. Promvong [7] представив вплив намотаного квадратного дроту на теплопередачу, коефіцієнт тертя та теплові характеристики в трубі теплообмінника, результат порівняний з круглими дрововими котушками.

Promvong та ін. [8] досліджували вплив на теплові характеристики нахилених під кутом 30° вихрових кілець із чотирма відносними кроками кілець і трьома відносними ширинами кілець у трубі, стінка якої обігрівалася однорідним тепловим потоком. Збільшення теплопередачі в сонячному повітрянагрівачі з використанням круглих кільцевих вставок-турбулізаторів, що мали різну кількість отворів на периферії кільця і співвідношення кроків вздовж труби, досліджували Asig та ін. [9]. Дослідження Chingtuaythong та Chokphoemphun [10] було спрямоване на використання модифікованого вихрового кільця, як стимулятора турбулентності для покращення теплових характеристик теплообмінника з круглих труб. Вихрове кільце було сконструйовано у формі овальної форми з п'ятикутним центральним отвором і встановлено в трубі під кутом атаки 45° відносно напрямку основного потоку. Було проведено експериментальне та чисельне дослідження для турбулентного режиму в умовах рівномірного підводу теплового потоку до стінки труби. За результатами цього дослідження авторами [10] зроблений висновок, що теплопередача та втрати тиску збільшуються зі збільшенням відносної ширини кільця та зі зменшенням просвіту кільця. Труба з пента-овальними вихровими кільцями забезпечує швидкість теплопередачі та втрату тиску відповідно у 2,25-4,86 і 14-100 разів вище, ніж гладка труба, в залежності від умов експлуатації.

В [11] експериментально досліджено три типи турбулізаторів, які встановлюються всередині круглої труби діаметром 36 мм: кільця з дроту діаметром 4 мм, дровова пружина такого ж діаметру та довжиною, яка дорівнює, вивчаємої ділянки труби та перетискання перерізу труби, отриманих шляхом часткового стискання зовнішньої поверхні по довжині труби з певним кроком, при цьому на внутрішній поверхні симетрично утворюються пари плавних виступів, повернутих на 90° один до одного. Експерименти виконані в діапазоні чисел Рейнольдса (3 - 15) 10^3 , в якості теплоносія використовується повітря, температура стінки в ході експерименту витримувалася постійною.

Автори [11] показали, що інтенсивність теплообміну в інтервалі перехідного режиму $3 \cdot 10^3 \leq Re < 15 \cdot 10^3$ в трубі із кільцевими турбулізаторами найбільша і в 2,9 рази вище, ніж у гладкої труби та на 15% більше, ніж у трубі із спіральними турбулізаторами, що має найгірший теплообмін. В той же час, закон опору виявився автотельним. Так, у труб з перетисками опір був найменшим серед досліджених турбулізаторів, але в 5 разів вищий, ніж у гладкої труби.

Найбільш ефективною за теплогідрравлічними та масогабаритними показниками виявилася теплообмінна труба з перетисками. Її застосування в теплообмінному апараті при заданому температурному рівні теплоносіїв зменшує його масу та габарити більш ніж у 2 рази і забезпечує його

компактність по відношенню до такого ж апарату, але виконаного з гладких труб. Крім того, перевага такої труби полягає ще й у тому, що в порівнянні з турбулізаторами у вигляді кілець і пружини, вона має дешевшу технологію виготовлення. Отже, найкращим інтенсифікатором з погляду теплообміну є кільце, проте з точки зору опору воно гірше, і навпаки, найкращими за опором є перетискання перерізу труби, що створюють трохи меншу інтенсивність тепловіддачі, ніж у кільце.

В роботах [12, 13] приведені експериментальні та числові дослідження з теплообміну і аеродинамічного опору всередині гвинтоподібних рівнорозвинених круглих труб з різними геометричними характеристиками поверхонь. Аналіз результатів показав, що застосування їх в теплообмінниках є достатньо ефективним методом інтенсифікації теплообміну. Дослідження конвективного теплообміну [12, 13] виконано для двох типорозмірів гвинтоподібних труб, які відрізняються висотою та кроками впадин/виступів, проведені в турбулентному діапазоні зміни чисел Рейнольдса ($10 - 60$) 10^3 при постійному тепловому потоці на стінці труби. Авторами показано, що інтенсивність теплообміну порівняно з гладкими трубами зростає у 1,5 – 2,6 рази, а зростання аеродинамічного опору відбувається у 6 – 9 разів. Використання гвинтоподібних труб в теплообмінному апараті при заданому температурному рівні зменшують його масу і габарити, більш ніж у 2 рази, забезпечуючи тим самим його компактність, в порівнянні з таким же апаратом, виготовленим з гладких круглих труб.

В Abdolbaqi та інш. [14] проведено експериментальне дослідження для вивчення впливу двох скручених стрічок, розташованих всередині плоскої труби, на інтенсивність теплообміну, коефіцієнт тертя та індекс теплового посилення. Скручені стрічки використовувалися, як генератори вихрового потоку на тестовій ділянці плоскої труби довжиною 1500 мм, причому, в одному випадку розташування, стрічки закручували потік у взаємно протилежних напрямках, а в іншому - закручування потоку відбувалось спільно в одному напрямку. Стрічки використовувалися з трьома різними коефіцієнтами кручення 5, 10 і 15 в діапазоні чисел Рейнольдса ($7,2 - 32,4$) $\cdot 10^3$ за рівномірних умов теплового потоку на стінці, в якості теплоносія застосовувалася вода. Кручені стрічки виготовлялися з алюмінію шириною 8 мм і товщиною стрічки 0,5 мм. Довжина стрічки співпадала з довжиною тестової ділянки.

Результати [14] показали, що число Нуссельта, коефіцієнт тертя та індекс теплового посилення збільшуються зі зменшенням коефіцієнта кручення, а розташування генератору з протилежним завихренням є більш ефективним, як спосіб підвищення теплообміну, ніж розташування стрічок зі спільним односпрямованим вихроутворенням. В рамках цього дослідження інтенсивність теплообміну в плоскій трубі з розташуванням стрічок з протилежним вихроутворенням приблизно на 22,5% і 61% вище, ніж з розташуванням стрічок зі спільним вихроутворенням і гладкою плоскою трубою, відповідно.

В [15] Pourdel та інш. виконали числове дослідження потоку рідини/нанорідини та теплообміну всередині плоскої труби в діапазоні числа Рейнольдса ($5-20$) 10^3 при постійному тепловому потоці на стінці, за допомогою методу кінцевого об'єму та алгоритму SIMPLEC. В якості турбулізаторів автори застосовували систему напівсферичних виступів, розташованих на внутрішній поверхні труби у коридорному порядку. Наявність їх всередині труби, зумовила створення значних змін у фізиці течії та температурному полі, яке значно вплинуло на гідродинаміку потоку і на внутрішню тепловіддачу. Результати показали, що при збільшенні числа Рейнольдса збільшується конвективний теплообмін (число Нуссельта) і підвищується коефіцієнт тертя. Крім того, зменшуючи безрозмірний крок і збільшуючи безрозмірний радіус виступів, збільшується число Нуссельта та коефіцієнт тертя. Відповідно до досліджуваної геометрії та її впливу на посилення теплопередачі, використання системи виступів або іншої шорсткості на поверхнях плоскої труби, а також різних видів нанорідин, як охолоджуючого теплоносія, рекомендується авторами застосовувати в компактних теплообмінниках [15].

Огляд літератури показав, що велика кількість досліджень присвячена інтенсифікації теплообміну в трубах звичайної круглої форми. В той же час, відповідно до огляду, дослідження труб некруглої, але зручнообтійної форми та застосування їх в якості основного трубчастого елемента в поверхнях нагріву, ще недостатньо висвітлені. Так, у Pis'mennui [16], автор показує, що заміна круглого профілю труби плоскоовальним за умови збереження периметра поперечного перерізу, дозволяє збільшити коефіцієнт теплопередачі, наприклад, повітронагрівача у 1,3–1,8 рази в залежності від рівня підвищення швидкості зовнішнього теплоносія, кроків труб та обраного ступеня подовження перерізу плоскоовального профілю. Очевидно, що теплоаеродинамічні характеристики поверхонь теплообмінників покращуються зміною форми поперечного перерізу труб з круглої на зручнообтійну – овальну або плоскоовальну, або одночасним розвитком внутрішньої і зовнішньої поверхонь труб радіальним вдавленням по колу ділянок їх стінок з утворенням кільцевих западин, що чергуються, і виступів трикутного профілю, як це показано у [12, 13]. Перехід від труб круглого профілю до плоскоовального з таким же периметром поперечного перерізу, як показано в невеликій кількості досліджень, дозволяє значно підвищити інтенсивність тепловіддачі одночасно і з внутрішньої, і з зовнішньої сторони труби. Підвищення внутрішньої тепловіддачі пов'язана зі зменшенням еквівалентного діаметру прохідного перерізу порівняно з круглою трубою. Механізм же підвищення інтенсивності тепловіддачі із зовнішнього боку

полягає у значному зниженні площі міделевого перерізу труби, а отже, сприяє підвищенню швидкості омивання зовнішнього теплоносія. Крім того, інтенсивність тепловіддачі на зовнішній поверхні зростає, завдяки зниженню частки поверхні труби, що взаємодіє з рециркуляційними течіями кормової вихрової зони, розміри якої значно менше, ніж у труб круглого перерізу.

Зі сказаного слідує, що застосування плоскої труби в комбінації з внутрішніми інтенсифікаторами призведе до різкого зростання тепловіддачі, але при цьому необхідно по можливості намагатися забезпечити помірне зростання гідравлічного опору, що загалом приведе до зниження металоємності теплообмінного апарату.

Враховуючи актуальність вище зазначених проблем і з метою отримання нових теплогідравлічних закономірностей та визначення впливу конструктивних характеристик турбулізаторів у вигляді пружинних вставок різних геометричних розмірів, розташованих всередині плоскої труби, на ефективність теплообміну, в НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського» розроблені методика їх досліджень і експериментальний стенд.

Експериментальний стенд. Експерименти виконані в проточній аеродинамічній трубі внутрішнім діаметром 36 мм, що працює за відкритою розімкненою схемою. В якості робочого середовища використовується повітря, що всмоктується з лабораторного приміщення. Ступінь турбулентності у вхідному перерізі труби становить трохи більше 0,3 % [17]. Схема стенду наведена на рис. 1.

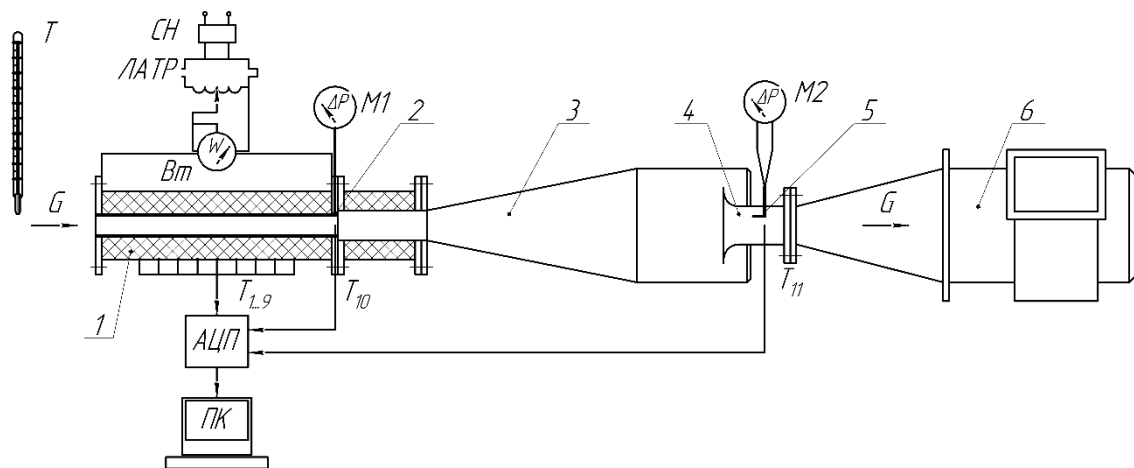


Рисунок 1. Схема експериментальної установки: 1 – робоча ділянка; 2 – штуцер відбору статичного тиску; 3 – дифузор; 4 – сопло; 5 – трубка Піто; 6 – вентилятор; АЦП – аналого-цифровий перетворювач; M1, M2 – мікроманометри; ПК – персональний комп'ютер; T – термометр; Вт – ватметр; ЛАТР – лабораторний автотрансформатор; СН – стабілізатор напруги

Робоча ділянка 1 у вигляді плоскої труби приєднується до всмоктуючого входу труби через фланець патрубку, а пружинна вставка 2 щільно розташовується всередині труби по всій її довжині.

Повітря всмоктувалося з лабораторного приміщення і рухалося через робочу ділянку, проточну частину та дифузор 3, до якого приєднувався витратовимірювальний блок, що складається з сопла 4, спрофільованого за лемніскастою діаметром $d_c = 0,036$ м, на виході з якого в одному перетині з дренажним отвором на стінці сопла встановлювалась трубка Піто 5. Це давало можливість визначати динамічний напір на виході з труби. До витратомірного блоку через гофровану трубу приєднувався відцентровий вентилятор типу ДВ – 1КМ з максимальними параметрами: витрати $G = 0,16$ м³/с та напором $P = 5000$ Па.

До складу експериментальної установки входять такі вимірювальні прилади:

- Ватметр типу Д5066 класу точності 0,5 використовуються для виміру потужності, які подаються на електронагрівач.

- Мікроманометр типу ММН-240(5)-1,0 класом точності $k = 1,0$ для визначення динамічного та статичного напорів.

- Барометр-анероїд типу БАММ класу точності 1,0, за допомогою якого визначається тиск навколишнього середовища.

- Ртутний термометр з ціною поділки 0,1 °С для вимірів температури повітря на вході в аеродинамічну трубу.

- Мідь-константанові термопари діаметром дроту 0,2 мм в кількості 11 штук для вимірювання вхідної та вихідної температури теплоносія і температурного поля стінки дослідної ділянки.

– Інформаційно-вимірювальний комплекс складався з двох аналого-цифрових перетворювачів (АЦП) ICP CON I-7018 і одного перетворювача інтерфейсів типу ICP CON I-7561 з виходом на персональний комп'ютер (ПК).

Схема робочої ділянки і її основні геометричні розміри показані на рис. 2.

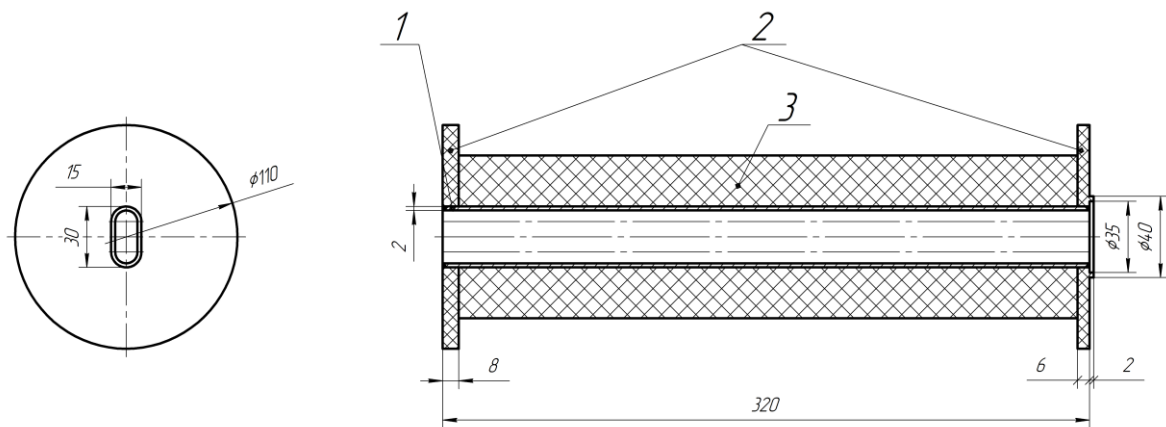


Рисунок 2. Зразок робочої ділянки плоскої труби: 1 – труба; 2 – фланець; 3 – теплоізоляція;

Електронагрівник являє собою намотаний на всю довжину робочої ділянки 320 мм ніхромового дроту діаметром 0,6 мм, що забезпечувало граничну умову на стінці $q = \text{const}$. Від зовнішнього середовища він тепло ізолювався. Розміри перерізу плоскої сталеві труби склали 30x15 мм товщиною 2 мм.

Методика обробки експериментальних даних.

Швидкість потоку всередині плоскої труби, м/с:

$$W_{\text{ТР}} = W_{\text{С}} (F_{\text{С}} \cdot \rho_{\text{С}}) / (F_{\text{ТР}} \cdot \rho_{\text{ТР}}),$$

де $F_{\text{С}}$ – площа перетину витратомірного сопла, м²; $F_{\text{ТР}}$ – площа перетину труби, м²; $\rho_{\text{С}}$, $\rho_{\text{ТР}}$ – густина повітря в відповідно соплі та в трубі, кг/м³.

Швидкість потоку в перетину витратомірного сопла, м/с:

$$W_{\text{С}} = 4,43 \cdot K_{\text{ТР}} \left((h \cdot K_{\text{ММН}}) / \rho \right)^{0,5},$$

де h – рівень відміток по шкалі мікроманометра, мм; $K_{\text{ММН}}$ – постійні приладу, при якій проводяться вимірювання перепадів тиску; густина повітря в соплі: $\rho = 0,464 \cdot B / (t_{\text{С}} + 273)$, кг/м³, B – значення барометричного тиску, Па; $K_{\text{ТР}}$ – поправковий коефіцієнт трубки Піто.

Середня температура потоку повітря в трубі визначалася балансовим методом з виразу, °С.

$$\bar{t}_{\text{П}} = t_{\text{ВХ}} + \frac{0,95P}{2G \cdot c_p}$$

де $t_{\text{ВХ}}$ – температура повітря на вході в трубу, °С; P – підведена до труби потужність від електронагрівача, Вт; G – витрата повітря через трубу, кг/с; c_p – питома теплоємність повітря

Середня арифметична температура стінки труби, °С:

$$\bar{t}_{\text{СТ}} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n}$$

де n – кількість термопар.

Середній коефіцієнт тепловіддачі в робочій ділянці, Вт/м² К:

$$\alpha_k = \frac{0,95 \cdot P}{H_{\text{ТР}} (\bar{t}_{\text{СТ}} - \bar{t}_{\text{П}})}$$

де $H_{\text{ТР}}$ – площа внутрішньої тепловіддаючої поверхні труби, м²

Число Рейнольдса, розраховане за еквівалентним діаметром плоскої труби $d_{\text{ЕК}}$:

$$\text{Re} = (W_{\text{ТР}} \cdot d_{\text{ЕК}}) / \nu,$$

швидкість в досліджуваній трубі, м/с; $d_{\text{ЕК}} = 4F_{\text{ТР}} / \Pi_{\text{ТР}}$ – еквівалентний діаметр плоскої труби, м; $\Pi_{\text{ТР}}$ – периметр плоскої труби; ν – кінематична в'язкість повітря в трубі, м²/с.

Число Нуссельта:

$$Nu = (\alpha \cdot d_{ек}) / \lambda,$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності повітря, Вт/м.

Опір плоскої труби визначається за формулою, Па:

$$\Delta p = (B - p_{мнн}) - (\rho_{тр} \cdot W^2_{тр}) / 2,$$

де $(B - p_{мнн})$ – перепад тисків на вході та виході досліджуваної труби, Па; B – барометричний тис, Па; $p_{мнн}$ – показання мікроманометра (за прямими вимірюваннями), Па; $\rho_{тр}$ – густина повітря в досліджуваній трубі, кг/м^3 .

Коефіцієнт опору труби:

$$\xi = \frac{2 \cdot \Delta p \cdot d_{ек}}{l \cdot \rho_{тр} \cdot w^2_{тр}},$$

де l – довжина труби, м.

Створений експериментальний стенд дозволяє досліджувати теплообмін і аеродинамічний опір плоскої труби з інтенсифікаторами при граничній умові $q = \text{const}$ в діапазоні зміни чисел Рейнольдса $(10,5 - 55,0) \cdot 10^3$. Електрична потужність нагрівача змінювалася в діапазоні $(50 - 150)$ Вт, середня температура повітря в трубі встановлювалася в діапазоні $(20 - 55)^\circ\text{C}$, а середня температура стінки труби - в інтервалі $(24 - 140)^\circ\text{C}$ у відповідності до потужності, що подавалася.

Результати досліджень. На рис.3 приведені порівняльні залежності розрахункових значень інтенсивності тепловіддачі плоскої та круглої труби, які мають однаковий периметр, але відрізняються площинами поперечних перерізів. Таким чином, внутрішній діаметр круглої труби 21 мм, який, одночасно є її еквівалентним діаметром. Еквівалентний діаметр плоскої труби визначається за вище зазначеною формулою та дорівнює 16,1 мм.

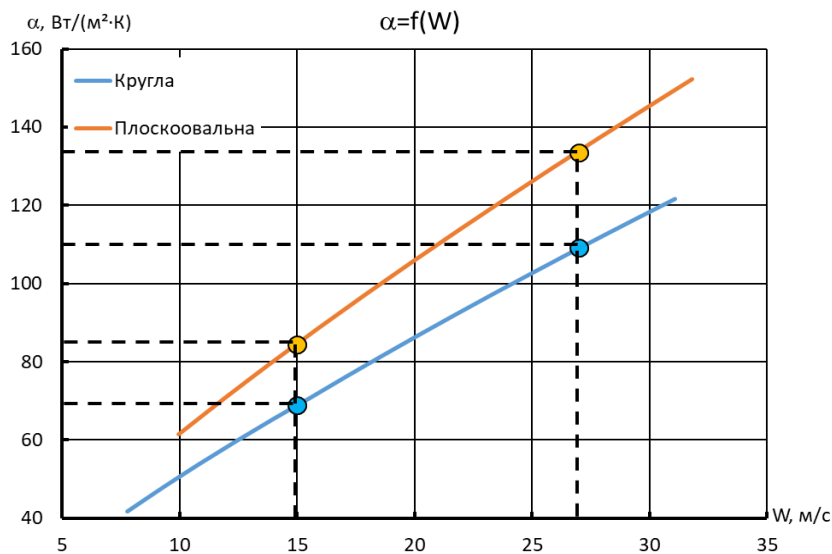


Рисунок 3. Інтенсивність тепловіддачі в залежності від швидкості повітря

З рис.3 слідує, що інтенсивність тепловіддачі в плоскій трубі вище, ніж в круглій. Зі збільшенням швидкості спостерігається монотонне зростання тепловіддачі в обох трубах. При однаковій витраті повітря через труби за рахунок зменшення еквівалентного діаметру, а отже, зменшення площі перерізу плоскої труби значно зростає швидкість, а отже, відповідно і інтенсивність тепловіддачі. З іншого боку, щоб отримати в круглій трубі, такий же рівень тепловіддачі, як і в плоскій, в круглій трубі потрібно збільшити швидкість, а в плоскій, навпаки, суттєво зменшити.

На рис.4 наведено зміну аеродинамічних опорів для плоскої та круглої труби в залежності від швидкості руху повітря. Як і очікувалося, в усьому діапазоні швидкостей аеродинамічний опір плоскої труби значно більший, ніж у круглій. Крім того, спостерігається його більш інтенсивніше зростання.

Таким чином, збільшення коефіцієнту тепловіддачі в плоскій трубі супроводжується одночасним збільшенням її аеродинамічного опору порівняно з круглою трубою.

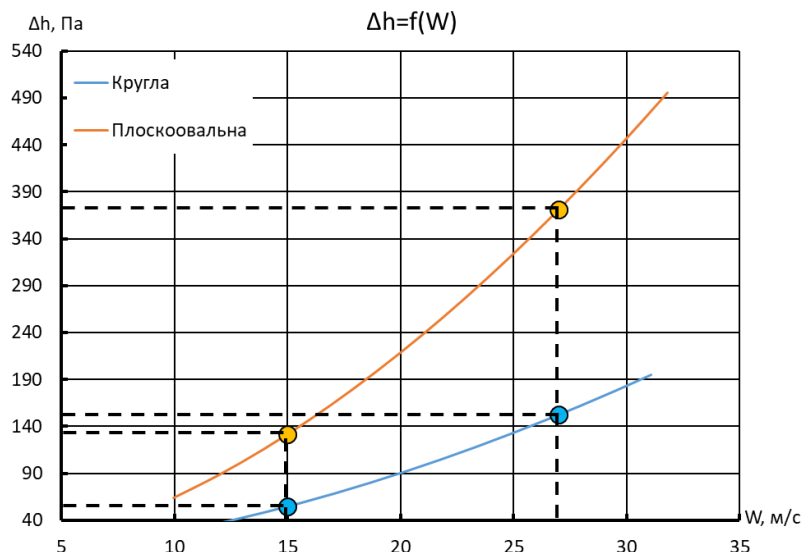


Рисунок 4. Аеродинамічний опір труби в залежності від швидкості повітря

На рис.5 представлені результати дослідження теплообміну в логарифмічних координатах $Nu - Re_e$ для плоскої і круглої труб. За визначальні геометричні розміри в числах подібності приймаються еквівалентні діаметри труб.

Для круглої труби інтенсивність середньої тепловіддачі для повітря і коротких труб при турбулентному режимі течії (лінія 3) описується формулою [18]:

$$Nu = 0,018 \cdot Re^{0,8} \cdot \varepsilon_l \quad (1)$$

де ε_l - поправка на початкову ділянку, залежить від довжини труби та числа Рейнольдса, в даних дослідженнях значення поправки змінювалися в діапазоні (1,13 – 1,08).

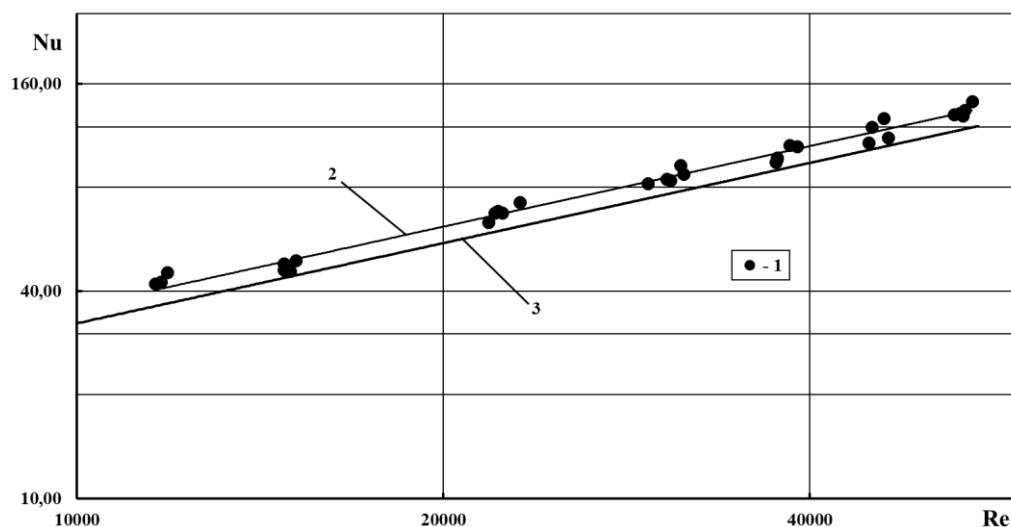


Рисунок 5. Узагальнення дослідних даних з теплообміну в плоскій трубі: 1 – експериментальні дані; 2 – апроксимаційна лінія за формулою (2); 3 – розрахункова лінія для круглої труби за формулою (1).

Експериментальні дані для плоскої труби апроксимовані формулою з похибкою $\pm 5\%$:

$$Nu = 0,028 \cdot Re_{de}^{0,78} \quad (2)$$

Порівняльний аналіз отриманих результатів (рис.5) показав, інтенсивність тепловіддачі в плоскій трубі у (1,1 – 1,2) рази вище, ніж для гладкої круглої труби.

На рис.6 приведені узагальнені дані у вигляді графічних залежностей в логарифмічних координатах $\xi - Re_e$. Емпірична формула Blasius для круглих труб при турбулентному режимі течії справедлива до $Re = 10^5$ і на графіку відповідає лінії 3.

$$\xi = 0,316 \cdot Re^{-0,25} \quad (3)$$

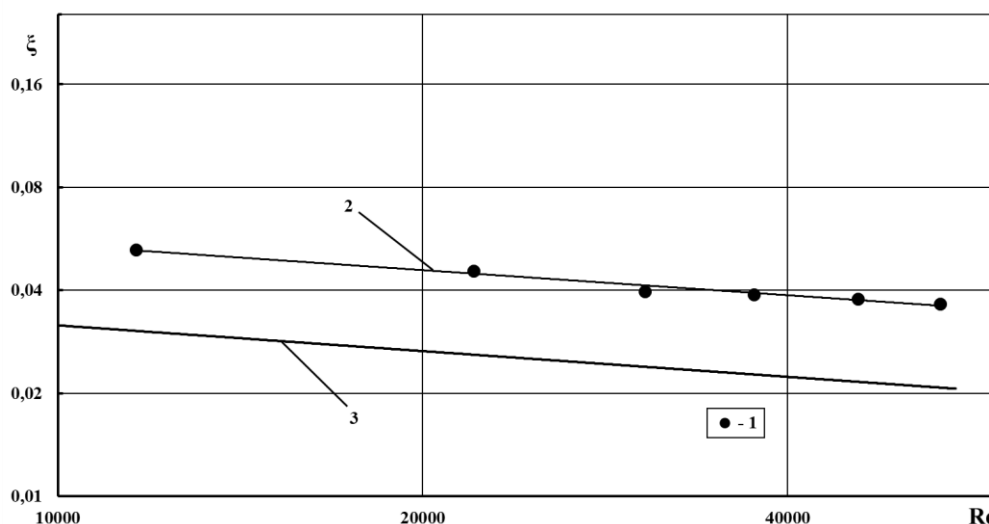


Рисунок 6. Узагальнення дослідних даних з аеродинамічного опору в плоскій трубі: 1 – експериментальні дані; 2 – апроксимаційна лінія за формулою (4); 3 – розрахункова лінія для круглої труби за формулою (3).

Експериментальні дані з аеродинамічного опору для плоскої труби апроксимовані формулою з похибкою $\pm 5\%$

$$\xi = 0,512 \text{Re}_{d_e}^{-0,244} \quad (4)$$

Порівняльний аналіз отриманих результатів (рис.6) показав, що коефіцієнт аеродинамічного опору плоскої труби у (1,4 – 1,7) рази вище, ніж для гладкої круглої труби.

Висновки. Розроблені і створені експериментальний стенд, методика та постановка досліджень інтенсивності теплообміну і аеродинамічного опору всередині плоскої труби.

Отримані нові експериментальні дані з теплообміну і аеродинамічного опору для плоскої гладкої труби. Показана перевага в теплообміні плоскої труби порівняно з круглою у інтенсивності теплообміну в 1,1 – 1,2 рази, але, при цьому, зростання інтенсивності теплообміну супроводжується підвищенням сумарних втрат тиску в плоскій трубі в 1,4 – 1,7 рази. Інтерпретація результатів досліджень та їх похибки не суперечать ступені адекватності існуючим законам і моделям теплообміну та аеродинаміки в трубах.

Запропоновані експериментальний стенд та методика є науково-технічною основою для перспективного розвитку досліджень теплообміну та аеродинамічного опору плоских труб з інтенсифікаторами у вигляді дротових пружин і виявлення нових закономірностей досліджуваного процесу.

Список використаної літератури

1. Burtsev S.A., Vasil'ev V.K., Burtsev S.A., Vasil'ev V.K., Vinogradov Yu.A., Kiselev N.A., Titov A.A. Experimental study of parameters of surfaces coated with regular relief. *Science and education. Scientific periodical of the Bauman MSTU*. 2013, January. No.1. P. 1-23.
2. Eiamsa-ard S., Somkleang P., Nuntadusit, C. and Thianpong C. Heat transfer enhancement in tube by inserting uniform/non-uniform twisted-tapes with alternate axes: Effect of rotated-axis length. *Applied Thermal Engineering*. 2013, 14 May. Vol. 54, Iss. 1. P. 289–309.
3. Chang S.W., Yang T.L., Liou J.S. Heat transfer and pressure drop in tube with broken twisted tape insert. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2007, November. Vol. 32, Iss. 2. P. 489–501.
4. Eiamsa-ard S., Promvong P. Enhancement of heat transfer in a tube with regularly-spaced helical tape swirl generators. *Solar Energy*. 2005, April. Vol. 78, Iss. 4. P. 483–494.
5. Keklikcioglu O., Ozceyhan V. Experimental investigation on heat transfer enhancement in a circular tube with equilateral triangle cross sectioned coiled-wire inserts. *Applied Thermal Engineering*. 2018, 25 February. Vol.131, P. 686–695.
6. Chang S. W., Gao J.Y., Shih H.L. Thermal performances of turbulent tubular flows enhanced by ribbed and grooved wire coils. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2015, November. Vol.90, P. 1109–1124.
7. Promvong P. Thermal performance in circular tube fitted with coiled square wires. *Energy Conversion Management*. 2008, May. Vol. 49, Iss. 5. P. 980–987.

8.Promvong P., Koolnapadol N., Pimsar M., Thianpong C. Thermal performance enhancement in a heat exchanger tube fitted with inclined vortex rings. *Applied Thermal Engineering*. 2014, 10 January Vol. 62, Iss. 1. P.285–292.

9.Acir A., Ata I., Canli M.E. Investigation of effect of the circular ring turbulators on heat transfer augmentation and fluid flow characteristic of solar air heater. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2016, October. Vol. 77. P. 45–54.

10.Chingtuaythong W., Chokphoemphun S. Thermal performance augmentation in heat exchanger tube with oval-pentagon rings. *Transactions of the TSME. Journal of Research and Applications in Mechanical Engineering*. 2018, 25 July. Vol. 6, No. 1, P. 50–62.

11.Рогачев В. А., Терех А. М., Бурлей В. Д., Семеняко А. В. Интенсификация теплообмена в круглой трубе. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2008, №1(22). С.36–42.

12.Демчук В., Рогачов В. А., Терех О. М., Руденко О. І. Теплоаеродинамічна ефективність гвинтоподібних труб з рівнорозвиненою поверхнею. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2007. Т53, №5/8. С.26-30.

13.Рева С. А. CFD – моделювання течії всередині гвинтоподібних труб. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2017, №4 (50). С.119-125.

14. Abdolbaqi M. Kh., Azmi W. H., Mamat Rizalman, Mohamed N. M. Z. N., Najafi G. Experimental investigation of turbulent heat transfer by counter and coswirling flow in a flat tube fitted with twin twisted tapes. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2016, July. Vol. 75. P. 295–302.

15. Pourdel H., Afrouzi H. H., Akbari O. A., Miansari M., Toghraie D., Marzban A., Koveiti A. Numerical investigation of turbulent flow and heat transfer in flat tube. Effect of dimples with operational goals. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2018, July. P. 3471–3483.

16. Pis'mennyi E. N. Ways for improving the tubular heaters used in gas turbine units. *Thermal Engineering*. 2012, Vol. 59, No. 6, P. 485–490.

17. Кулинич В.С., Рогачов В.А., Терех О.М. Методика експериментального дослідження теплообміну та аеродинамічного опору в плоскоовальному каналі з інтенсифікаторами. *Теплова енергетика: шляхи реєновачії та розвитку: зб. наук. праць XVIII міжнар. наук.-практ. конф. Київ, 2022* С.239 – 243.

18. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. *Теплопередача: учебник для вузов*. М. В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. М.: Энергоиздат, 1981. 416 с.

V. Kulynych¹, PhD student, ORCID 0000-0002-5934-6423

V. Rohachov¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0001-5489-874X

O. Terekh¹, Cand. Sc. (Eng.), sen. res. assoc., ORCID 0000-0002-1320-8594

¹**National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"**

THE STUDY OF HEAT TRANSFER INTENSITY AND AERODYNAMIC DRAG INSIDE A FLAT PIPE

It is known that a heat exchange tube with a flat-oval profile has excellent thermal and aerodynamic characteristics in contrast to a round tube. Thus, with the same planes, a flat tube has a significant increase in thermal and aerodynamic efficiency compared to a round tube, which is widely used in industry. However, at present, there are a limited number of publications on the study of heat transfer and aerodynamics inside a flat pipe.

In this paper, we present the methodology and results of the study of heat transfer and aerodynamic drag in a pipe, and describe the experimental stand for such studies.

The experiments performed in a flowing wind tunnel with an internal diameter of 36 mm, operating in an open-loop circuit. The working medium is air drawn from the laboratory room. The prototype was a steel pipe with a flat-oval profile, 320 mm long, 30x15 mm cross section, and 2 mm wall thickness.

The created experimental stand allows us to study the heat transfer and aerodynamic drag of a flat pipe under the boundary condition $q = \text{const}$. An electric heater ensured this condition, which is a nichrome wire with a diameter of 0.6 mm wound along the entire length of the pipe and insulated from the external environment.

The experiments were carried out in the range of Reynolds numbers (10.5 - 55.0) 10^3 and dissipated powers (50 - 150) W. The average air temperature in the pipe was set in the range (20 - 55) °C, and the average temperature of the pipe wall was set in the range (24 - 140) °C in accordance with the electric power supplied to the heater.

Empirical correlations proposed for determining the intensity of heat transfer and aerodynamic drag inside a flat pipe. The data had compared with a round tube. The results had analyzed, and it had shown for the first time that the intensity of heat transfer and aerodynamic drag in a flat-oval pipe is 1.1 to 1.2 times and 1.4 to 1.7 times higher, respectively.

Keywords: flat tube, heat transfer intensity, aerodynamic drag, intensifier.

References

1. S.A. Burtsev, V.K. Vasil'ev, S.A. Burtsev, V.K. Vasil'ev, Yu.A. Vinogradov, N.A. Kiselev and A.A. Titov, "Experimental study of parameters of surfaces coated with regular relief," *Scienc and educacion. Scientific periodical of the Bauman MSTU*, no.1, pp. 1-23, Jan. 2013.
2. S. Eiamsa-ard, P. Somkleang, C. Nuntadusit and C. Thianpong, "Heat transfer enhancement in tube by inserting uniform/non-uniform twisted-tapes with alternate axes: Effect of rotated-axis length," *Applied Thermal Engineering*, vol. 54, iss. 1, pp. 289–309, May 2013.
3. S.W. Chang, T.L. Yang and J.S. Liou, "Heat transfer and pressure drop in tube with broken twisted tape insert," *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 32, iss. 2, pp. 489–501, Nov. 2017.
4. S. Eiamsa-ard and P. Promvonge, "Enhancement of heat transfer in a tube with regularly-spaced helical tape swirl generators," *Solar Energy*, vol. 78, iss. 4, pp. 483–494, Apr. 2005.
5. O. Keklikcioglu and V. Ozceyhan, "Experimental investigation on heat transfer enhancement in a circular tube with equilateral triangle cross sectioned coiled-wire inserts," *Applied Thermal Engineering*, vol. 131, pp. 686–695, Fed. 2018.
6. S.W. Chang, J.Y. Gao and H.L. Shih, "Thermal performances of turbulent tubular flows enhanced by ribbed and grooved wire coils," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 90, pp. 1109–1124, Nov., 2015.
7. P. Promvonge, "Thermal performance in circular tube fitted with coiled square wires," *Energy Conversion Management*, vol. 49, iss. 5, pp. 980–987, May 2008.
8. P. Promvonge, N. Koolnapadol, M. Pimsar and C. Thianpong, "Thermal performance enhancement in a heat exchanger tube fitted with inclined vortex rings," *Applied Thermal Engineering*, vol. 62, iss. 1, pp. 285–292, Jan. 2014.
9. A. Acir, I. Ata and M.E. Canli, "Investigation of effect of the circular ring turbulators on heat transfer augmentation and fluid flow characteristic of solar air heater," *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 77, pp. 45–54, Oct. 2016.
10. W. Chingtuaythong and S. Chokphoemphun, "Thermal performance augmentation in heat exchanger tube with oval-pentagon rings," *Transactions of the TSME. Journal of Research and Applications in Mechanical Engineering*, vol. 6, no. 1, pp. 50–62, Jul. 2018.
11. V. A. Rogachev, A. M. Terekh, V. D. Burley and A. V. Semenyako, "Intensification of heat exchange in a round tube," *Energy: economy, technology, ecology*, no. 1(22), pp. 36-42, 2008.
12. V. Demchuk, V.A. Rogachev, O.M. Terekh and O.I. Rudenko, "Thermal and aerodynamic efficiency of helical tubes with equidistant surface," *East European Journal of Advanced Technologies*, vol. 53, no. 5/8, pp. 26-30, 2007.
13. S.A. Reva, "CFD modeling of flow inside helical pipes," *Energy: economy, technology, ecology*, no. 4(50), pp. 119-125, 2017.
14. M. Kh. Abdolbaqi, W. H. Azmi, Mamat Rizalman, N. M. Z. N. Mohamed, G. Najafi, "Experimental investigation of turbulent heat transfer by counter and coswirling flow in a flat tube fitted with twin twisted tapes," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 75, pp. 295–302, Jul. 2016.
15. H. Pourdel, H. H. Afrouzi, O. A. Akbari, M. Miansari, D. Toghraie, A. Marzban and A. Koveiti, "Numerical investigation of turbulent flow and heat transfer in flat tube. Effect of dimples with operational goals," *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, pp. 3471 – 83, Jul. 2018.
16. E. N. Pis'mennyi, "Ways for improving the tubular heaters used in gas turbine units," *Thermal Engineering*, vol. 59, no. 6, pp. 485–490, 2012.
17. V.S. Kulynych, V.A. Rogachev and O.M. Terekh, "Methods of experimental study of heat transfer and aerodynamic drag in a flat-oval channel with intensifiers," In *Thermal power engineering: ways of renovation and development: collection of scientific works of the XVIII international scientific and practical conference*. Kyiv, 2022, pp. 239 – 243.
18. V.P. Isachenko, Ed., *Heat transfer: textbook for universities*. M: Energoizdat, 1981.

Надійшла: 28.03.2023

Received: 28.03.2023

ТЕХНОЛОГІЇ ТА ОБЛАДНАННЯ В ЕНЕРГЕТИЦІ

TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT IN ENERGY

УДК 629.031

DOI 10.20535/1813-5420.2.2023.279688

В.І.Скалозубов¹, д-р техн. наук, проф., ORCID 0000-0003-2361-223X

В. А. Кондратюк², канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0001-5035-311X

Є.М.Письменний², д-р техн. наук, профе., ORCID 0000-0001-6403-6596

О.А. Дорож¹, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0001-8495-2911

А. І. Остапенко², інженер, ORCID 0000-0003-3980-1609

¹Міжвідомчий центр фундаментальних наукових досліджень в галузі енергетики та екології
НАН України, «Одеської політехніки» та Мінекології України

²Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

МЕТОД КВАЛІФІКАЦІЇ МОДЕРНІЗАЦІЙ АКТИВНИХ СИСТЕМ БЕЗПЕКИ ДЛЯ ЗАПОБІГАННЯ ГІДРОДИНАМІЧНІЙ НЕСТІЙКОСТІ

Основні причини виникнення гідродинамічної нестійкості в системах безпеки – інерційне запізнення реакції регулюючої арматури і напірно-витратної характеристики насосів на «швидкі» зміни гідродинамічних параметрів у системах ядерних енергоустановок. Одна з причин виникнення гідродинамічної нестійкості у режимі пуску насосів системи підживлення реакторного контуру високого тиску пов'язана з інерційним запізненням реакції напірно-витратної характеристики насосів на швидкі зміни режимних параметрів (витрати, тиску та ін.). Наслідками гідродинамічної нестійкості в системі підживлення реакторного контуру високого тиску можуть бути: порушення умов компенсації витрати можливих теч; гідро- і термічні «удари» та інші негативні ефекти в робочих і аварійних режимах реактора. не запобігає умовам виникнення гідродинамічної нестійкості у перехідному режимі пуску насосів. Запропоновано альтернативний підхід модернізації системи підживлення реакторного контуру високого тиску демпфуючими пристроями. На основі проведеного моделювання модернізованої системи визначено умови та конструкційно-технічні вимоги до запобігання гідродинамічної нестійкості у перехідних режимах пуску насосів.

Ключові слова: гідродинамічна нестійкість, модернізація, система, ядерна енергоустановка.

Вступ. Традиційні підходи аналізу безпеки ядерних енергоустановок ґрунтуються на моделюванні вихідних аварійних подій (протікання/розриви трубопроводів, відмови систем важливих для безпеки, припинення електропостачання енергоблоків та інші) імовірнісними та детерміністськими методами. Аналіз відомих результатів моделювання цих вихідних аварійних подій, що наведений в галузевих звітах з аналізу безпеки українських АЕС, встановив необхідність того, що при аналізі при аналізі безпеки необхідно враховувати вихідні події пов'язані з виникненням різних видів термодинамічної і гідродинамічної нестійкості (ГДН) в системах ядерних енергоустановок, що є важливими для безпеки. Наслідки ГДН – підвищена інтенсивність гідродинамічних і термічних ударів, які можуть істотно вплинути на надійність та цілісність обладнання і трубопроводів, наприклад, [1, 2]

Результати цих досліджень визначили необхідність модернізації активних систем безпеки для запобігання умовам гідродинамічної нестійкості. Проте, відповідно до українських нормативних вимог, що регулюють ядерну та радіаційну безпеку, будь-яка модернізація систем, важливих для безпеки ядерних енергоустановок, має бути кваліфікована розрахунковими чи експериментальними методами на забезпечення умов безпеки.

У роботі запропоновано розрахунковий метод кваліфікації модернізацій активних систем безпеки ядерних енергоустановок з ВВЕР. В результаті проведеної кваліфікації розробленим методом встановлено, що модернізація активних систем безпеки регулюючої арматурою. Актуальність модернізацій активних систем безпеки (СБ) (з електронасосами) визначається необхідністю запобігання гідродинамічній нестійкості (ГДН) у перехідних режимах пуску насосів. У представленій роботі розглянуте питання модернізацій активних СБ для запобігання умовам ГДН у перехідних режимах аналізуються на прикладі

системи підживлення теплоносієм реакторного контуру високого тиску.

Аналіз літературних джерел. Основна причина виникнення ГДН у робочих режимах СБ – інерційність параметрів настройки регулюючої арматури до відносно «швидких» змін гідродинамічних параметрів при аваріях ЯЕУ [1], а у перехідних режимах пуску СБ – інерційність запізнення реакції напірно-витратної характеристики (НВХ) на «швидку» зміну гідродинамічних параметрів у каналах СБ та обладнанні ЯЕУ [3].

Системою безпеки реакторної установки з ВВЕР для якої необхідно проведення розрахункової кваліфікації можливої модернізації спрямованої на визначення і зменшення умов виникнення ГДН є Система підживлення реакторного контуру високого тиску (ТК). Ця система призначена для компенсації відносно малих теч теплоносія (так звані «компенсуємі течі») у робочих і аварійних режимах [1 – 6 та ін.]. Система ТК ВВЕР є трьох каналною. Кожний канал складається з: баку запасу теплоносія; електронасосу високого протитиску та відносно малої витрати; регулюючої і запірної арматури.

Спрацьовування ТК відбувається в автоматичному режимі за сигналом «Зниження тиску в 1-му контурі».

Основною особливістю системи ТК відносно інших активних СБ ЯЕУ з ВВЕР є спрацьовування в разі необхідності в робочих режимах без аварійної зупинки реактора.

У роботах автора [3, 6] встановлено, що в перехідних режимах пуску насосів подібних ТК систем можуть виникнути умови ГДН внаслідок інерційного запізнення реакції НВХ насосів. В роботі [7] представлено методи обґрунтування ефективних конструкційно-технічних параметрів демпфуючих пристроїв для запобігання ГДН у робочих і перехідних режимах СБ з насосами.

Наслідки ГДН – високо амплітудні коливання гідродинамічних параметрів (швидкості, тиску) та формування умов гідро термодинамічних ударів. Тому, враховуючи особливості експлуатації системи ТК, питання запобігання умовам ГДН у цій системі має підвищену актуальність.

Регулююча арматура в системі ТК не забезпечує запобігання умовам ГДН у перехідному режимі пуску насосів зі швидким збільшенням витрати і може бути ефективною для наступних етапів сталих робочих режимів (наприклад, [2, 6]). Однак саме пуск насосів є визначальним режимом умов ГДН у системі ТК. Граничним щодо швидкості зміни гідродинамічних параметрів у каналах СБ є перехідний режим пуску насосів. Внаслідок інерційного запізнення реакції НВХ насосів СБ швидке збільшення витрати (швидкості потоку) відбувається при максимальному збільшенні тиску.

Таким чином, необхідною є кваліфікація альтернативних підходів модернізації системи ТК для запобігання умовам ГДН у перехідних режимах пуску насосів, що визначає актуальність представленої роботи.

Мета роботи. Метою роботи є розробка розрахункового методу кваліфікації модернізації активних систем безпеки ядерних енергоустановок з ВВЕР на прикладі системи, важливої для безпеки, ТК для запобігання умовам гідродинамічної нестійкості

Метод кваліфікації модернізації системи ТК. Основні положення і допущення.

1 Необхідна умова виникнення ГДН [8] – перехідний режим пуску насосів СБ, коли внаслідок інерційного запізнення реакції напірно-витратної характеристики (НВХ) насосів на швидке збільшення витрати відбувається відхилення гідродинамічних параметрів від рівноважного стану номінального робочого режиму.

2. Достатня умова виникнення ГДН базується на термодинамічних закономірностях нестійкості систем (наприклад, [9,10]). Наслідком ГДН одночасне збільшення тиску та маси теплоносія.

3. Теплоносій в ТК і в поєднаних системах РК моделюється як система з осередненими за об'ємами гідродинамічними параметрами.

Підхід модернізації системи ТК для запобігання умов гідро-динамічної нестійкості заснований на широко використовуваних в різних областях енергетики демпфуючі пристрої (ДП). ДП є герметичною судиною, що з'єднана з трубопроводом системи і частково заповнена рідкою фазою. Регулювання витрати здійснюється стисненням/розширенням газового об'єму ДП.

Аналогом ДП у ЯЕУ з ВВЕР є компенсатор тиску в реакторному контурі.

Загальні критерії та умови ГДН систем [10]:

$$K_{ns} = \frac{\Delta P}{\Delta M} > 0, \quad (1)$$

де ΔP , ΔM – одночасні зміни тиску і маси в системі.

У системі «реакторний контур – ТК» умова ГДН (1) визначається співвідношенням масової витрати в течу G_1 та витратою в каналі ТК G .

Якщо $G_1 > G$, то $\Delta M > 0$, $\Delta P > 0$ і $K_{ns} > 0$ – система нестійка (1). Якщо $G_1 < G$, то $\Delta M < 0$, $\Delta P < 0$ і $K_{ns} > 0$ – система також нестійка (1).

Таким чином, для запобігання ГДН необхідно превентивно усувати невідповідність витрат у течу та в каналі ТК із застосуванням ДП.

Умова балансу витрат у системі «реакторний контур – ТК – ДП»:

$$G_1 = G - G_D, \quad (2)$$

де G_D – масова витрата рідкої фази в ДП.

Витрата в течу реакторного контуру:

$$G_1 = \mu F_1 \sqrt{\rho(P_R - P_{out})}. \quad (3)$$

Рівняння балансу мас і стану газової фази в ДП для ізотермічних процесів:

$$\frac{d(\rho_g V_g)}{dt} = 0, \quad P_g V_g = P_0 V_{g0}, \quad \frac{dV_g}{dt} = -G_D; \quad (4)$$

$$V_g(t=0) = V_{g0}, \quad P_g(t=0) = P_0. \quad (5)$$

Рівняння руху в каналі ТК при пуску насоса [6, 7]:

$$L \frac{dG}{dt} = F \left[\Delta P_m - P_R + P_g - \xi \frac{G^2}{\rho F^2} \right], \quad (6)$$

де L, F – довжина та площа прохідного перетину трубопроводу ТК; μ – гідравлічний коефіцієнт витрати в течу; F_1 – еквівалентна площа прохідного перетину течі; ρ – щільність теплоносія; P_R, P_{out} – середній тиск у/поза реакторним контуром; V_g – об'єм газової фази в ДП; P_g – тиск у газовій фазі ДП; ΔP_m – максимальний напір тиску насоса; ξ – сумарний гідравлічний коефіцієнт опору каналу ТК.

Після перетворення рівнянь (2) – (6) отримаємо систему нелінійних диференціальних рівнянь у безрозмірному критеріальному форматі:

$$\frac{dP_g}{dt} = K_1 P_g (G - G_1), \quad (7)$$

$$\frac{dG}{dt} = K_2 G^2 + K_3 P_g + K_4, \quad (8)$$

де $P_g = P_g / P_0$; $G = G / G_m$; $t = t / t_m$; $G_1 = G_1 / G_m$;

$$K_1 = \frac{\rho_{g0} a_{g0}^2 t_m G_m}{P_0 V_{g0}}; \quad K_2 = -\frac{\xi t_m G_m}{\rho L F}; \quad K_3 = \frac{P_0 F t_m}{L G_m}; \quad K_4 = \frac{F t_m (\Delta P_m - P_R)}{L G_m}; \quad t_m = \frac{\rho L F}{G_m};$$

$$G_m = F \sqrt{\rho(\Delta P_m - P_R)}$$

при початкових умовах

$$P_g(t=0) = 1; \quad G(t=0) = 0. \quad (9)$$

У загальному випадку рішення системи нелінійних рівнянь (7) – (9) може бути отримано чисельними методами.

Консервативне рішення за умови $G = 1$ для тиску в газовому об'ємі ДП:

$$P_g = \exp[K_1(1 - G_1)t]. \quad (10)$$

За умови $G_1 < 1$ об'єм рідкої фази в ДП збільшується ($G_D > 0$), а газовий об'єм стискується і збільшується тиск у ДП до настання умов $G_D = 0$.

За умови $G_1 > 1$ об'єм рідкої фази в ДП зменшується ($G_D < 0$), а газовий об'єм розширюється і зменшується тиск у ДП до настання умов $G_D = 0$.

Таким чином, ДП ТК компенсує розходження витрат G і G_1 , а також забезпечує гідродинамічну стійкість теплоносія в реакторному контурі в робочих та аварійних режимах.

Мінімально необхідний початковий газовий об'єм ДП $\min V_{g0}$ визначається з умови:

$$\max P_g(\min V_{g0}) < P_{max}, \quad (11)$$

де P_{max} – гранично допустимий тиск на корпус ДП (початок руйнування ДП).

Максимальний розмір течі $\max F_1$, що компенсує ТК, визначається з формул (3) і (6) для умов номінального режиму ТК:

$$\max F_1 = \frac{F \sqrt{\rho(\Delta P_0 - P_R + P_g)} / \xi}{\mu \sqrt{\rho(P_R - P_{out})}}, \quad (12)$$

де ΔP_0 – напір тиску насоса ТК у номінальному сталому режимі.

Обговорення результатів. Отримані результати та розроблений метод кваліфікації можуть бути використані при обґрунтуванні модернізації систем для безпеки ВВЕР. Це може бути здійснене при модернізації система підживлення реакторного контуру високого тиск шляхом використання демпфуючих пристроїв. Така модернізація дозволить компенсувати розходження масову витрату в течу та витрату в каналі ТК, а також забезпечить гідродинамічну стійкість теплоносія в реакторному контурі в робочих та аварійних режимах .

В разі, коли демпфуючий пристрій буде герметичною судиною, що з'єднана з трубопроводом системи і частково заповнена рідкою фазою, то регулювання витрати буде здійснюється стисненням/розширенням його газового об'єму.

Для обґрунтування ефективних конструкційно-технічних параметрів демпфуючих пристроїв для запобігання умовам гідродинамічної нестійкості в системах безпеки в стаціонарних робочих режимах і в перехідних робочих режимах може бути використаний відповідний метод наведений в [8].

Висновки

1. Основна причина виникнення ГДН у режимі пуску насосів системи підживлення реакторного контуру високого тиску пов'язана з інерційним запізненням реакції НВХ насосів на швидкі зміни режимних параметрів (витрати, тиску та ін.).

2. Наслідками ГДН в системі підживлення реакторного контуру високого тиску можуть бути: порушення умов компенсації витрати можливих теч; гідро- і термічні «удари» та інші негативні ефекти в робочих і аварійних режимах реактора.

3. Регулююча арматура не запобігає умовам виникнення ГДН у перехідному режимі пуску насосів.

4. Запропоновано альтернативний підхід модернізації системи підживлення реакторного контуру високого тиску демпфуючими пристроями. На основі проведеного моделювання модернізованої системи визначено умови та конструкційно-технічні вимоги до запобігання ГДН у перехідних режимах пуску насосів.

Список використаної літератури

1. Васильченко В. Н., Емельяненко Е. З., Скалозубов В. И., Смышляев А. Е., Ким В. В. Моделирование аварий на ядерных энергетических установках атомных электростанций. Одесса: Резон 2000, 2002. 466 с.

2. Комплекс методов переоценки безопасности атомной энергетики Украины с учетом уроков экологических катастроф в Чернобыле и Фукусиме / Под ред. В. И. Скалозубова. Одесса: Астропринт, 2013. 242 с.

3. Skalozubov V., Kozlov I., Chulkin O., Komarov Yu., Piontkovskiy O. Analysis of reliability-critical hydraulic impact conditions at WWER-1000 NPP active safety systems. *Nuclear & Radiation Safety*. 2019. No. 1(81). P. 42 – 45.

4. IAEA-EBP-WWER-08. Guidelines on Pressurized Thermal Shock Analysis for WWER Nuclear Power Plants. Vienna: IAEA, 2006. 66 p.

5. Sauvage E., Musoyan G. Nuclear Reactor Severe Accident Analysis: Applications and Management Guidelines. *SARnet 17* (Budapest, Hungary, April 1 – 11, 2008).

6. OECD Workshop on the Implementation of Severe Accident Management Measures (Villigen-PSI, Switzerland, September 10 – 13, 2001). (Pre-Print of the Proceedings).

7. V. Kondratyuk, V. Skalozubov, Ju. Komarov, S. Kosenko, D. Fedorov. Prevention of hydrodynamic instability conditions in safety systems with pumps of nuclear power plants. *Proceeding of Odessa Polytechnic University*. №1(65), 2020

8. Skalozubov V. I., Huiyu Zhou, Chulkin O. A., Pirkovskiy D. S. Modelling method of conditions for reliability-critical hydraulic impacts on pumps of thermal and nuclear power plants. *Problems of Atomic Science and Technology*. 2017. No. 4(110). P. 74 – 78.

9. Науково-технічні основи заходів підвищення безпеки АЕС з ВВЕР. Інститут проблем безпеки АЕС. Національна академія наук України. Під редакцією О.О. Ключнікова, Чорнобиль, 2012, 296 с.

10. Antonyuk N., Gerliga V., Skalozubov V. Excitation of thermoacoustic oscillations in a heated channel. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 1990. V. 59, Iss. 4. P. 1323 – 1328.

V. Skalozubov¹, Dr. Sc. (Eng.), Prof., ORCID 0000-0003-2361-223X
V. Kondratyk², Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0001-5035-311X
Y. Pysmennyy², Dr. Sc. (Eng.), Prof., ORCID 0000-0001-6403-6596
O. Dorozh¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0001-8495-2911
I. Ostapenko², engineer, ORCID 0000-0003-3980-1609

¹ Interagency Center for Fundamental Scientific Research in Energy and Ecology
Sector of National Academy of Sciences of Ukraine,
Odessa Polytechnic and Ministry of Ecology and Natural Resources of Ukraine
²National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

METHOD OF QUALIFICATION OF MODERNIZATION OF ACTIVE SAFETY SYSTEMS TO PREVENT HYDRODYNAMIC INSTABILITY

The main reason for the hydrodynamic instability in the start-up mode of the pumps of the high-pressure reactor makeup system is related to the inertial delay in the reaction of the pump head and rate to rapid changes in operating parameters (flow rates, pressure, etc.). The consequences of the hydrodynamic instability in the high-pressure reactor makeup system can be: violation of the conditions for compensating the flow of possible leaks; hydro- and thermal "shocks" and other negative effects in the operating and emergency modes of the reactor. The control armature does not prevent the conditions for the hydrodynamic instability in the transient mode of pump start-up.

An alternative approach to modernizing the high-pressure reactor makeup system with damping devices is proposed. Based on the performed modelling of the modernized system, the conditions and constructional and technical requirements for the prevention of the hydrodynamic instability in the transient modes of pump start-up were determined.

Key words: hydrodynamic instability, modernization, system, nuclear power plant

References

1. Vasilchenko V. N., Emelyanenko E. Z., Skalozubov V. I., Smyshlyaev A. E., Kim V. V. Modeling of accidents at nuclear power plants of nuclear power plants. Odessa: Reason 2000, 2002. 466 c.
2. A set of methods for reassessing the safety of nuclear energy in Ukraine, taking into account the lessons of environmental disasters in Chernobyl and Fukushima, Ed. V. I. Skalozubov. Odessa: Astroprint, 2013. 242 c.
3. Skalozubov V., Kozlov I., Chulkin O., Komarov Yu., Pionkovskiy O. Analysis of reliability-critical hydraulic impact conditions at WWER-1000 NPP active safety systems. *Nuclear & Radiation Safety*. 2019. No. 1(81). P. 42 – 45.
4. IAEA-EBP-WWER-08. Guidelines on Pressurized Thermal Shock Analysis for WWER Nuclear Power Plants. Vienna: IAEA, 2006. 66 c.
5. Sauvage E., Musoyan G. Nuclear Reactor Severe Accident Analysis: Applications and Management Guidelines. *SARnet 17* (Budapest, Hungary, April 1 – 11, 2008).
6. OECD Workshop on the Implementation of Severe Accident Management Measures (Villigen-PSI, Switzerland, September 10 – 13, 2001). (Pre-Print of the Proceedings).
7. V. Kondratyk, V. Skalozubov, Ju. Komarov, S. Kosenko, D. Fedorov. Prevention of hydrodynamic instability conditions in safety systems with pumps of nuclear power plants. *Proceeding of Odessa Polytechnic University*. №1(65), 2020.
8. Skalozubov V. I., Huiyu Zhou, Chulkin O. A., Pirkovskiy D. S. Modelling method of conditions for reliability-critical hydraulic impacts on pumps of thermal and nuclear power plants. *Problems of Atomic Science and Technology*. 2017. No. 4(110). P. 74 – 78.
9. Scientific and technical foundations for the advancement of AES and VVER security. AES Institute for Safety Problems. National Academy of Sciences of Ukraine. Edited by O.O. Klyuchnikova, Chornobyl, 2012, 296 p.
10. Antonyuk N., Gerliga V., Skalozubov V. Excitation of thermoacoustic oscillations in a heated channel. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 1990. V. 59, Iss. 4. P. 1323 -1328.

Надійшла: 17.02.2023

Received: 17.02.2023

МАЙБУТНЄ АТОМНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ УКРАЇНИ З ПОЗИЦІЇ РОЗВИТКУ НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВОЇ ЕКОНОМІКИ

У даній статті проведено дослідження майбутнього розвитку енергетики з метою скорочення викидів парникових газів. Розглядається три різних варіанти планування використання електрогенеруючих підприємств та визначення найбільш оптимального для довкілля та економіки країни на основі графіків динаміки викидів парникових газів в атмосферу. Оцінка та вибір найбільш оптимального варіанту відбувається на основі Стратегії низьковуглецевого розвитку України.

Визначено види генерації електроенергії, що найбільше забруднюють навколишнє середовище, та ті що практично не забруднюють. Розглянуто у відсотковому співвідношенні, яка частка виробленої електроенергії припадає на кожен вид генерації та динаміку виробництва електроенергії протягом останніх років. Також в даній статті наведено приклад відмови однієї з країн від атомної енергетики, та які наслідки це мало для енергобалансу та розвитку низьковуглецевої економіки. Було визначено найдоцільніший варіант розвитку електростанцій в Україні та розглянуто, яким чином в майбутньому можна збільшити частку електроенергії виробленої на атомних станціях і зменшити частку електроенергії, виробленої на теплових електричних станціях. Розвиток атомної енергетики позитивно впливає на енергонезалежність держави, тому її потрібно розвивати та за можливості переходити на нові типи реакторів для того аби енергетика ставала ще більш безпечною.

Ключові слова: електроенергія, економіка, атомна енергетика, теплоенергетика, енергоефективність.

Вступ

Стратегія низьковуглецевого розвитку економіки [1] передбачає зниження викидів парникових газів при економічному зростанні і соціальному розвитку країни. Така стратегія була розроблена з метою вирішення питання зміни клімату шляхом прийняття певних заходів. Останнім часом спостерігається зростання кількості виробництва вуглекислого газу, тому поступово середньорічна температура нашої планети підвищується, тим самим впливаючи на підвищення рівня океану, внаслідок танення льодовиків.

На збільшення кількості вуглекислого газу впливає багато різних чинників. Одним з них є виробництво електроенергії. Безумовно, зелені види енергії [2] є значно безпечнішими для довкілля ніж традиційні [3], проте усі вони мають не тільки переваги, але й суттєві недоліки. Для того, аби майбутні покоління людства не мали проблем з довкіллям, про це потрібно думати вже зараз і приймати якісь рішення.

Для того щоб мати шляхи вирішення цього питання, необхідно зрозуміти, яким чином можна перевести промисловість та інші галузі економіки в потрібне русло, знижуючи при цьому виробництво шкідливих речовин.

Економіка України [4] є дуже енерговитратною. Енергоємність економіки, в час коли наша держава стала незалежною, була вищою у декілька разів ніж у інших європейських держав. З розвитком нашої країни було прийнято низку законів та інших нормативних документів, спрямованих на зниження енергоємності економіки та підвищення енергонезалежності, що є дуже важливим в наш час. Концепція стратегії низьковуглецевого розвитку економіки передбачає поступове зниження відсотку виробленого вуглекислого газу та підвищення енергонезалежності економіки нашої держави, в тому числі завдяки розвитку ядерної енергетики.

Мета та завдання

Метою статті є дослідження шляхів зменшення виробництва парникових газів промисловістю та іншими галузями, визначення методів підвищення ефективності виробництва електроенергії та вибір найбільш ефективного варіанту зниження кількості вуглекислого газу в майбутньому. Завданням статті є визначення оптимального варіанту розвитку енергетики країни для зниження кількості парникових газів відповідно до глобальних цілей сталого розвитку.

Матеріал і результати досліджень

Стратегія низьковуглецевого розвитку економіки України передбачає модернізацію декількох різних секторів, що мають вплив на зростання кількості вуглекислого газу. Розглядається три найбільш доцільних варіанти прогнозів викидів парникових газів. Проте таке порівняння дає лише показовий

результат для прийняття тих чи інших рішень. Реальні цифри викидів вуглекислого газу [5] пізніше 2022 року можуть суттєво відрізнятись, але динаміка зростання викидів парникових газів дозволяє оцінити та обрати найбільш оптимальний варіант розвитку енергетики України в майбутньому.

В першому варіанті передбачається, що переважним напрямком розвитку буде підвищення енергоефективності [6]. На рисунку 1 можемо спостерігати динаміку викидів парникових газів при цьому сценарії.

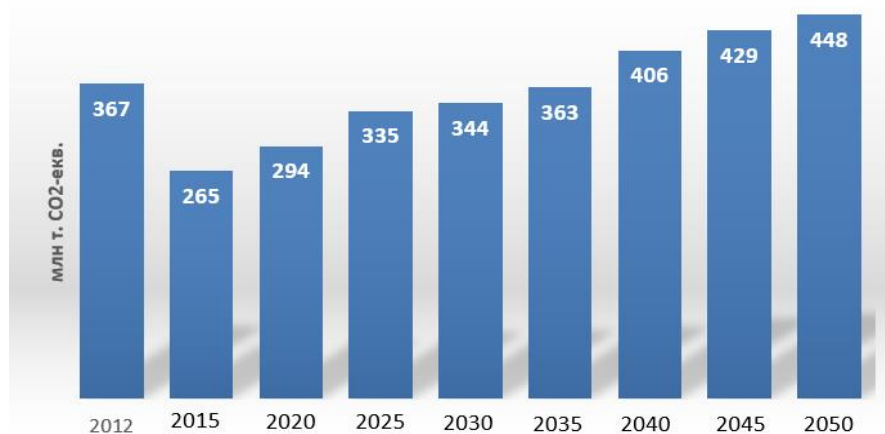


Рисунок 1 – Прогноз викидів парникових газів при варіанті розвитку енергоефективності

Для підвищення енергоефективності, яке передбачає також і зростання енергетичної ефективності будівель, необхідне державне фінансування. Також необхідні певні заходи для більш економічного використання теплової енергії. Потрібно розвивати технології у агропідприємствах і промисловості.

В другому варіанті пропонується, що разом з енергоефективністю необхідно розвивати відновлювальну енергетику [7]. Передбачається, що відновлювальна енергетика повинна частково замінити теплові електричні станції. Виробництво має бути екологічно сталим. Для виробництва теплової і електричної енергії пріоритетним є використання біогазу. Для цього варіанту також є необхідною інтеграція відновлювальної енергетики до міжнародної системи [8]. На рисунку 2 можемо бачити динаміку викидів парникових газів при пріоритеті енергоефективності та відновлювальної енергетики.

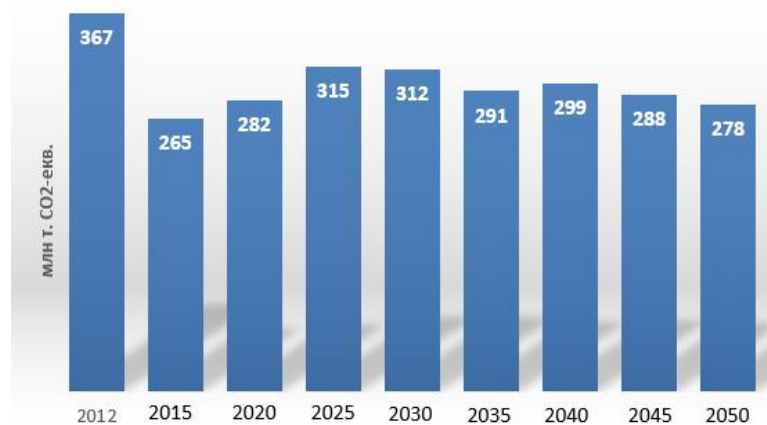


Рисунок 2 – Прогноз викидів парникових газів при варіанті розвитку енергоефективності та відновлювальної енергетики

Третім варіантом є більш розширений другий варіант, що включає модернізацію вже існуючих технологій промисловості та виробництва електроенергії і введення інновацій [9]. Цей варіант передбачає модернізацію багатьох галузей і технологій: теплові електростанції, атомні станції, електричні мережі, транспортна галузь, технології акумулювання енергії, виробництво водню, когенерація на місцевому та регіональному рівнях.

З наведених графіків можна бачити, що другий та третій варіанти є дуже подібними, проте використання відновлювальної енергетики є досить складним питанням, через свої особливості.

Найбільшою перевагою відновлювальної енергетики є те, що джерело енергії постійно відновлювальне і нема необхідності в корисних копалинах. Добування сонячної енергетики є безпечним

для довкілля, проте вітрова енергетика створює певний рівень шуму. Потребу в електроенергії нашої держави можна було б повністю задовольнити, але це б зайняло дуже багато вільної території, яку можна використовувати під сільське господарство. Використання традиційних джерел енергії займає набагато менші площі і такі електричні станції мають набагато більшу потужність. Тому найкращим варіантом є поєднання зеленої енергетики з модернізацією вже існуючих джерел енергії. На рисунку 4 можемо спостерігати графік зростання кількості виробленої електроенергії в Україні протягом останніх років [10].

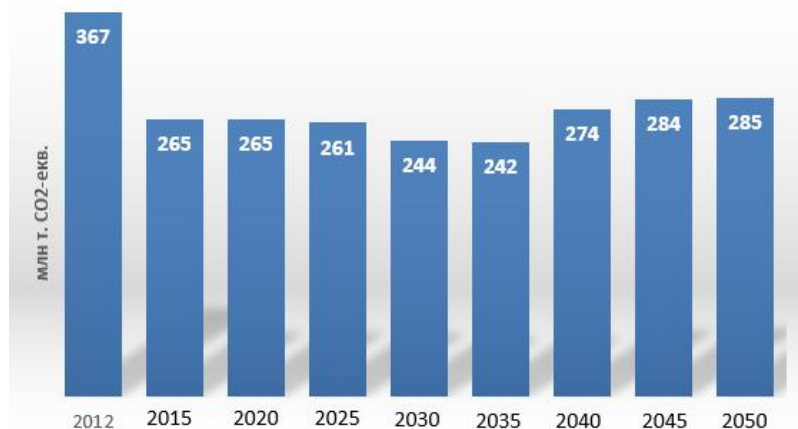


Рисунок 3 – Прогноз викидів парникових газів при варіанті розвитку енергоефективності, відновлювальної енергетики, модернізації технологій та інновацій

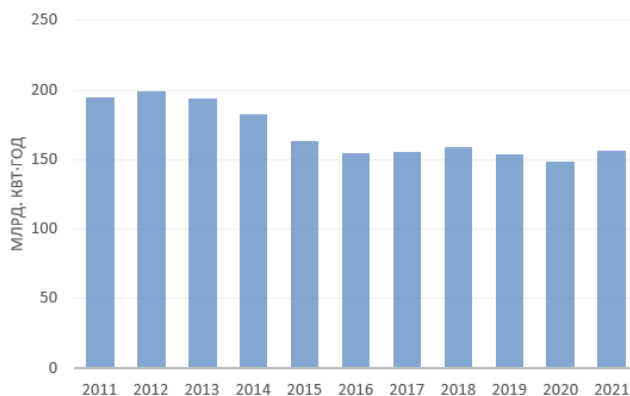


Рисунок 4-Динаміка виробництва електроенергії в Україні

Динаміка виробництва електроенергії в Україні протягом останніх років не мала зростання. Частково це пов'язано з модернізацією обладнання на підприємствах та промисловості.

В 2021 році електроенергія вироблена атомними електричними станціями [11] складала 51% проти 7% виробленої за допомогою відновлювальних джерел енергії, тому можемо бачити, що для повного переходу на відновлювальну енергетику потрібні дуже великі затрати.

Багато європейських країн зараз прирівнюють атомну енергетику до «зелених» видів енергетики через низький вплив на навколишнє середовище. У порівнянні з тепловими електричними станціями викиди у навколишнє середовище від атомних електричних станцій менші в багато разів. Оскільки майже половина електроенергії України виробляється на АЕС, тому атомна енергетика вносить суттєвий вклад в економіку нашої держави. Також ця електроенергія є найдешевшою для користувачів у порівнянні з іншими способами виробництва електроенергії.

Атомна галузь є однією з найбільш важливих складових економіки, адже завдяки виробленій електроенергії може працювати велика кількість підприємств, при цьому існує велика кількість робочих місць. Низка європейських країн пішла шляхом стимулювання розвитку ядерно-енергетичного комплексу [12].

Важливим питанням на сьогоднішній день є енергонезалежність держави. Для цього необхідно мати власні потужності виробництва палива для підприємств що виробляють електроенергію. Тому потрібно мати атомні станції, що безпосередньо займаються виробництвом електроенергії, заводи, які добувають уранову руду, та заводи, що будуть збагачувати таку руду до необхідного відсотку, і виготовляти

тепловиділяючі збірки, які використовуються в ядерних реакторах. Україна має досить значні поклади уранової руди. Оцінювані запаси складають понад 100 тисяч тон [13]. Цих запасів нам би вистачило б на понад 100 років, проте ми змушені закуповувати тепловиділяючі збірки в інших держав. При налагодженні процесу виробництва ядерного палива в Україні можна було б говорити про незалежність в паливній галузі.

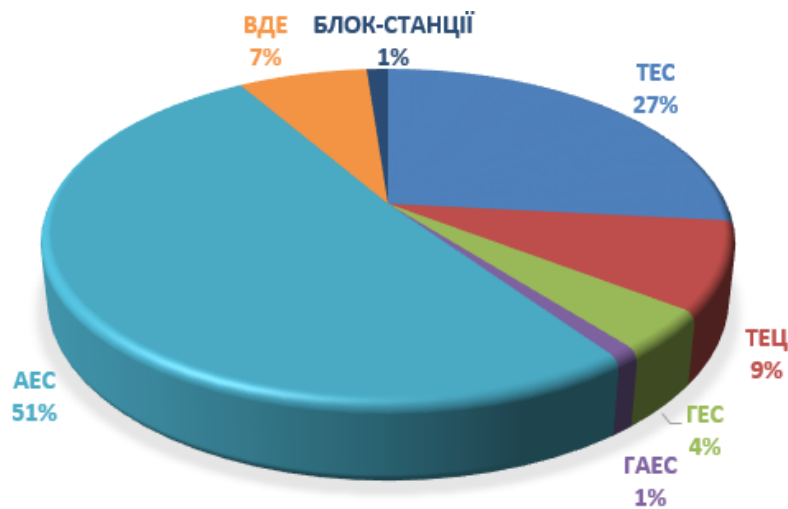


Рисунок 5- Структура виробництва електроенергії

Серед базових видів генерації енергії атомні станції є найбільшим джерелом низьковуглецевої електроенергії. Цей вид енергетики майже не призводить до збільшення викидів CO₂ та є безперебійним джерелом енергії. Міжурядовою групою з питань зміни клімату розробляються сценарії декарбонізації енергетики. Відповідно до них до 2050 року потужність ядерних установок необхідно збільшити на 60-100%. Це дозволить збільшити кількість низьковуглецевої енергії, створити стійку енергосистему з невисокими цінами на електроенергію.

Показовим прикладом доцільності використання атомної енергетики є Німеччина. Відмовившись від виробництва електроенергії на АЕС, було прийнято рішення перейти на відновлювальні джерела енергії. Проте за несприятливих кліматичних умов сонячні та вітрові електричні станції не змогли забезпечити необхідної кількості електроенергії. Компенсувати це довелося за допомогою вугільних теплових електричних станцій. В зв'язку з цим сумарна кількість шкідливих речовин в повітрі перевищила середньостатистичний показник. Це є гарним прикладом того, що сонячна та вітрова енергії не є стабільними. Погода при цьому має одне з найважливіших значень. Потрібно враховувати кількість хмарних і безвітряних днів, опади, пилові бурі, сніжні зими. Тому передбачити скільки вітрової чи сонячної енергії буде вироблено протягом року дуже складно. Виходом з цієї ситуації є певні базові потужності, які в потрібні моменти можуть бути запущені та будуть давати ту кількість електроенергії, яку не можуть в певний час виробити відновлювальні джерела енергії.

Декарбонізація енергетики передбачає зниження викидів парникових газів у атмосферу. Порівняльна характеристика викидів парникових газів від різних видів генерації електроенергії [14] зображена в таблиці 1.

Найбільше парникових газів продукують теплові електричні станції, що працюють на газі та на вугіллі. Сонячні електричні станції продукують майже в 10 разів менше вуглекислих газів на одну вироблену кВт·годину. Найменше виробляють вуглекислого газу атомні електричні станції та гідроелектростанції, тому їх використання є пріоритетним.

Таблиця 1- Кількість CO₂ в залежності від виду генерації електроенергії.

Вид генерації електроенергії	Викид CO ₂ гр. на 1 кВт·год
ТЕС(вугілля)	879
ТЕС(природний газ)	620
Сонячні електростанції	64
ГАЕС	17
Вітрові електростанції	14
Атомна енергетика	8
ГЕС	6

В Україні також планується побудова нових реакторів з метою знизити викиди парникових газів та зменшення використання ТЕЦ. Планується, що нові енергоблоки будуть американського виробництва

типу AP-1000 [15]. Реактор такого типу володіє найсучаснішими технологіями, тому є набагато безпечнішим, ніж ті, що експлуатуються зараз. Перспективною є технологія побудови малих модульних реакторів. Вони мають низку переваг, легше і швидше будуються, їх можна компактно розмістити. Експлуатація таких енергоблоків є набагато простішою ніж великих реакторів. Хоч нові типи реакторів є набагато сучаснішими ніж ті, що вже експлуатуються, вони все одно потребують уранового палива. Експериментальний тип термоядерного реактора не потребує уранового палива, для реакції необхідне використання дейтерій-тритійової плазми [16]. Процес, що відбувається в реакторі цього типа протилежний до того, що відбувається в звичайному реакторі. В новій установці ядра не розщеплюються, а зливаються, тому тут є свої інженерні і фізичні особливості. Реалізація такого проекту дозволить вийти на новий рівень атомної енергетики і ще більше знизити зростання кількості парникових газів у атмосфері.

Висновки

З розвитком різноманітних технологій потреба в електроенергії лише зростає, проте разом з цим зростають викиди парникових газів до атмосфери. Це призводить до змін клімату і підвищення середньорічної температури. Для того, аби бути в гармонії з природою необхідно усіма можливими способами вже зараз знижувати викиди вуглекислого газу. Завдяки правильному розподілу між різними видами генеруючих установок можна досягти зниження кількості вироблених шкідливих елементів, тим самим сповільнити зміни клімату.

Перехід від спалювання газу та вугілля до відновлювальної і атомної енергетики дозволяє вирішити проблему чистого виробництва електроенергії. Тому поступово необхідно будувати нові енергогенеруючі потужності та вдосконалювати вже існуючі технології. Основним напрямком є розвиток атомної енергетики та перехід від ланцюгової реакції ділення урану до термоядерного синтезу. Хоча зараз ця технологія є досить новою та ще не має практичного застосування, в подальшому вона може повністю замінити реактори, що працюють на природному і збагаченому урановому паливі.

Список використаної літератури

1. Стратегія низьковуглецевого розвитку України. URL: https://mepr.gov.ua/files/docs/Proekt/LEDS_ua_last.pdf (дата звернення: 08.09.2022).
2. Розвиток зеленої енергетики в Україні. Екологія промислового краю. URL: <https://ecoindustry.pro/avtorski-statti/rozvytok-zelenoi-energetyky-v-ukrayini> (дата звернення: 08.09.2022).
3. Нараєвський, С. В. "Класифікація традиційних та альтернативних джерел і технологій отримання енергії." Економічні науки. Сер.: Економіка та менеджмент, 2012: 255-269 с.
4. Бойчук, Н.Я.; Острянюк, М. М. Проблеми енергозбереження та підвищення енергоефективності економіки України. Сучасні проблеми економіки і підприємництва, 2017: 25-34 с.
5. Концентрація CO₂, показники доіндустріальної епохи. Українська Енергетика. URL: <https://ua-energy.org/uk/posts/kontsentratsiia-co2-vpolovynu-perevyshchyla-pokaznyku-doindustrialnoi-epokhy> (дата звернення: 08.09.2022).
6. Беленкова, О. Ю.; Остапенко, І. О. Економічна оцінка заходів з підвищення енергоефективності. Будівельне виробництво, 2013: 28-31 с.
7. Дороніна, І.І. Нормативно-правове забезпечення розвитку відновлюваної енергетики в Україні. Public Administration, 2020: 44 с.
8. ЛІР, В. Енергетична політика сталого розвитку як вектор інтеграції Україна-ЄС. Науковий вісник [Одеського національного економічного університету], 2016: 158-176.
9. Олексюк, В. М. Енергетичні інновації як фактор досягнення енергетичної незалежності економіки України. Ефективна економіка, 2014: 3 с.
10. Динаміка і структура виробництва електроенергії в Україні. URL: <https://vse.energy/spec-projects/infographpek/1615-electricity> (дата звернення: 08.09.2022).
11. Структура електрогенерації в Україні та її зв'язок із тарифами на електроенергію. ТЕК - Надійний постачальник електричної енергії та газу в Україні. URL: <https://tek.energy/news/struktura-elektrogeneratsii-v-ukraini-ta-ii-zvyazok-iz-tarifami-na-elektroenergiyu> (дата звернення: 08.09.2022).
12. «Зелено-жадібно»: чому альтернативна енергетика не рятує довкілля. URL: <https://mind.ua/publications/20206516-zeleno-zhadibno-chomu-alternativna-energetika-ne-ryatue-dovkillya> (дата звернення: 08.09.2022).
13. Уранові родовища України: Історія відкриття та розроблення. Центральноукраїнський державний педагогічний університет імені Володимира Винниченка. URL: <https://www.cuspu.edu.ua/ua/mizhnarodna-naukovo-praktychna-internet-konferentsiia-stratehii-innovatsiinoho-rozvytku-pryrodnychkh-dystsyplyn-dosvid-problemy-ta-perspektyvy/seksiia-3-heohrafiia-ta-pryrodokorystuvannia/10934-uranovi-rodovyshcha-ukrayiny-istoriya-vidkryttya-ta-rozoblennya> (дата звернення: 08.09.2022).
14. Викиди та поглинання парникових газів в Україні. Кафедра аналітичної хімії, Хімічний факультет, КНУ ім. Тараса Шевченка. URL: https://anchem.knu.ua/books/zuy/clim_3.htm (дата звернення: 08.09.2022).
15. Tjanjono, Hendro. Effect of air condition on AP-1000 containment cooling performance in station black out accident. Jurnal Teknologi Reaktor Nuklir Tri Dasa Mega, 2015.
16. Гончар, Д.Р. Термоядерна генерація: переваги та недоліки, економічна доцільність використання. Редакційна колегія, 2008.

V. Konshin¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0003-2591-3589

B. Kviatkoskyi¹, graduate student, ORCID 0000-0002-8610-3531

¹National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

THE FUTURE OF ATOMIC ENERGY IN UKRAINE FROM THE POSITION OF THE DEVELOPMENT OF A LOW-CARBON ECONOMY

This article studies the future development of the energy industry with the aim of reducing greenhouse gas emissions. Three different options for planning the use of electricity-generating enterprises and determining the most optimal for the environment and economy of the country based on graphs of the dynamics of greenhouse gas emissions into the atmosphere are considered. The assessment and selection of the most optimal option is based on the Low-Carbon Development Strategy of Ukraine.

The types of electricity generation that most pollute the environment and those that practically do not pollute have been determined. The share of produced electricity accounted for by each type of generation and the dynamics of electricity production in recent years were considered in percentage terms. Also, this article provides an example of one of the countries abandoning nuclear energy, and what consequences this had for the energy balance and the development of a low-carbon economy. The most appropriate option for the development of power plants in Ukraine was determined and it was considered how in the future it is possible to increase the share of electricity produced at nuclear power plants and reduce the share of electricity produced at thermal power plants. The development of nuclear energy has a positive effect on the country's energy independence, so it must be developed and, if possible, switched to new types of reactors in order to make energy even more secure.

Keywords: *electricity, economy, nuclear energy, heat energy, energy efficiency.*

References

1. Low-carbon development strategy of Ukraine. [Online]. Available at: https://mepr.gov.ua/files/docs/Proekt/LEDS_ua_last.pdf. [Accessed: 8-Sep-2022].
2. Development of green energy in Ukraine. [Online]. Available at: <https://ecoindustry.pro/avtorski-statti/rozvytok-zelenoyi-energetyky-v-ukrayini>. [Accessed: 8-Sep-2022].
3. S. V. Narayevskyi, "Classification of traditional and alternative energy sources and technologies." *Economic sciences. Economics and management*, 2012: 255-269 p.
4. N.Y. Boychuk, M. M Ostryanko. *Problems of energy saving and increasing energy efficiency of the economy of Ukraine. Modern problems of economy and entrepreneurship*, 2017: 25-34 p.
5. CO2 concentration, indicators of the pre-industrial era. *Ukrainian Energy*. [Online]. Available at: <https://ua-energy.org/uk/posts/kontsentratsiia-co2-vpolovynu-perevyshchyla-pokaznyky-doindustrialnoi-epokhy>. [Accessed: 8-Sep-2022].
6. O. Y. Belenkova; I. O. Ostapenko, *Economic assessment of energy efficiency improvement measures. Construction production*, 2013: 28-31 p.
7. I.I. Doronina, *Regulatory and legal support for the development of renewable energy in Ukraine. Public Administration*, 2020: 44 p.
8. V. LIR, *Energy policy of sustainable development as a vector of Ukraine-EU integration. Scientific journal [Odessa National Economic University]*, 2016: 158-176p.
9. V. M. Oleksyuk, *Energy innovations as a factor in achieving energy independence of the Ukrainian economy. Efficient economy*, 2014: 3 p.
10. *Dynamics and structure of electricity production in Ukraine*. [Online]. Available at: <https://vse.energy/spec-projects/infographpek/1615-electricity>. [Accessed: 8-Sep-2022].
11. *The structure of electricity generation in Ukraine and its connection with electricity tariffs. TEK - A reliable supplier of electricity and gas in Ukraine*. [Online]. Available at: <https://tek.energy/news/struktura-elektrogeneratsii-v-ukraini-ta-ii-zvyazok-iz-tarifami-na-elektroenergiyu> [Accessed: 8-Sep-2022].
12. "Green-greedy": why alternative energy does not save the environment. [Online]. Available at: <https://mind.ua/publications/20206516-zeleno-zhadibno-chomu-alternativna-energetika-ne-ryatue-dovkillya> [Accessed: 8-Sep-2022].
13. *Uranium deposits of Ukraine: History of discovery and development. Central Ukrainian State Pedagogical University named after Volodymyr Vinnichenko*. [Online]. Available at: <https://www.cuspu.edu.ua/ua/mizhnarodna-naukovo-praktychna-internet-konferentsiia-strategii-innovatsiinoho-rozvytku-pryrodnych-ykh-dystyplin-dosvid-problemy-ta-perspektyvy/sektsiia-3-heohrafiia-ta-pryrodokorystuvannia/10934-uranovi-rodovyschcha-ukrayiny-istoriya-vidkrytya-ta-rozroblennya> [Accessed: 8-Sep-2022].
14. *Emissions and absorption of greenhouse gases in Ukraine. Department of Analytical Chemistry, Faculty of Chemistry,aras Shevchenko National University of Kyiv*. [Online]. Available at: https://anchem.knu.ua/books/zuy/clim_3.htm [Accessed: 8-Sep-2022].
15. Tjanjono, Hendro. *Effect of air condition on AP-1000 containment cooling performance in station black out accident. Jurnal Teknologi Reaktor Nuklir Tri Dasa Mega*, 2015.
16. D.R. Gonchar, *Thermonuclear generation: advantages and disadvantages, economic feasibility of use. Editorial board*, 2008.

Надійшла: 28.12.2022

Received: 28.12.2022

Д. В. Філянін¹, канд. техн. наук., ст. викладач, ORCID 0000-0003-3576-3633

В. П. Калінчик¹, канд. техн. наук., доц., ORCID 0000-0003-4028-0185

О. В. Мейта¹, канд. техн. наук., доц., ORCID 0000-0002-4132-5202

А. В. Волошко¹, д-р техн. наук, проф., ORCID 0000-0002-6867-2060

В. В. Пирятинський¹, студент, ORCID 0000-0002-5673-8958

¹Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ЗАСТОСУВАННЯ АСКОЕ ДЛЯ ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ДЖЕРЕЛ ГАРМОНІЙНИХ СПОТВОРЕНЬ

Одним з найважливіших компонентів ринку електроенергії є його інструментальне забезпечення, що являє собою набір систем, приладів, пристроїв, каналів зв'язку, алгоритмів і таке інше для контролю та управління параметрами енергоспоживання та енергопостачання. Базою формування та розвитку інструментального забезпечення є автоматизовані системи контролю та обліку електроенергії (АСКОЕ). Крім завдань контролю енергоспоживання та енергопостачання, АСКОЕ доцільно використовувати також для вирішення завдань контролю якості електроенергії, визначення винуватців гармонійних спотворень та визначення ступеня участі кожного елемента електричної мережі у розподілі потужності вищих гармонік з метою підвищення якості та надійності електропостачання споживачів та коригування величини оплати за спожиту електроенергію. У цій публікації розглянуто питання щодо можливості використання АСКОЕ для контролю гармонійного складу кривих напруги та струму в системах електропостачання з метою ідентифікації та оцінки джерел гармонійних спотворень. Розглянуто структурну схему АСКОЕ промислового об'єкта з використанням комунікаційного сервера та її основні компоненти. Проведено короткий огляд найбільш використовуваних інтегральних схем, що застосовуються при розробці та виготовленні сучасних лічильників електроенергії або первинних вимірювальних перетворювачів. Запропоновано алгоритм розширення функціональних можливостей первинних вимірювальних перетворювачів за рахунок використання зовнішнього сигнального процесора, що дозволяє контролювати гармонійний склад електроенергії, реєструвати потужність і енергію вищих гармонік. Розглянуто питання застосування первинних вимірювальних перетворювачів та локальних пристроїв збору та обробки даних (ЛПЗОД) із реєстрацією потужності та енергії вищих гармонік у складі АСКОЕ.

Ключові слова: АСКОЕ, якість електроенергії, вищі гармоніки, потужність вищих гармонік, джерело гармонік.

Вступ. Одним з найважливіших компонентів ринку електроенергії є його інструментальне забезпечення, яке є набором систем, приладів, пристроїв, каналів зв'язку, алгоритмів і т. д. для контролю та управління параметрами енергоспоживання та енергопостачання. Базою формування та розвитку інструментального забезпечення є АСКОЕ.

Крім завдань контролю енергоспоживання та енергопостачання, АСКОЕ доцільно використовувати також для вирішення завдань контролю якості електроенергії, визначення винуватців гармонійних спотворень та визначення ступеня участі кожного суб'єкта електричної мережі у розподілі потужності вищих гармонік з метою підвищення якості та надійності електропостачання споживачів та коригування розміру платні за електроенергію.

Мета та завдання дослідження. Метою даної роботи є запропонування алгоритму розширення функціональних можливостей первинних вимірювальних перетворювачів, що дозволяє контролювати гармонійний склад електроенергії та реєструвати потужність і енергію вищих гармонік. Також розглянути питання застосування первинних вимірювальних перетворювачів з реєстрацією потужності і енергії вищих гармонік в складі АСКОЕ.

Матеріал і результати досліджень. Для вирішення завдань контролю якості електроенергії та визначення ступеня участі кожного елемента системи електропостачання (СЕП) в розподілі потужності вищих гармонік доцільно використовувати АСКОЕ.

Основним компонентом АСКОЕ є так званий первинний вимірювальний перетворювач, тобто лічильник електроенергії. Вся архітектура АСКОЕ будується «від лічильника». Залежно від кількості лічильників, їх типу, виду інтерфейсу («струмова петля» (CL), RS-485/RS-422, RS-232, GSM-модем, Power Line модем, тощо), віддаленості лічильників від місця збору інформації, наявності/відсутності каналів зв'язку, пропонується те чи інше рішення.

На промислових підприємствах встановлюється велика кількість лічильників. Тому, з метою зниження протяжності та кількості ліній зв'язку, а також оптимізації інформаційних потоків, виникає необхідність встановлення проміжного пристрою збору інформації – так званого локального пристрою

збору та обробки даних (ЛПЗОД), що виконує функцію маршрутизатора та пристрою первинної обробки даних. На рис. 1 наведено структурну схему АСКОЕ великого промислового об'єкта.

У НДІ «Енергія» спільно з НВП «Енергія+» розроблено сімейство мікросерверів ІТЕК-web, призначених для використання в АСКОЕ як ЛПЗОД.

Мікросервер ІТЕК-web призначений для забезпечення зв'язку та узгодження інтерфейсів між багатофункціональними електронними лічильниками та сервером бази даних (БД), а також самостійного опитування лічильників та зберігання даних, отриманих в результаті опитування лічильників у вбудованій енергонезалежній пам'яті. Спеціалізоване вбудоване програмне забезпечення (ПЗ) підтримує протоколи обміну даними з лічильниками IEC1107, DLMS, IEC1142, а також деякі нестандартні протоколи, які забезпечують можливість прозорої передачі даних від лічильника до сервера БД. Крім того, вбудоване програмне забезпечення мікросервера забезпечує самостійне опитування лічильників, відповідно до тимчасового регламенту та запрограмованого сценарію опитування, а також експорт накопиченої інформації в сервер БД у режимі сервера (за запитом) або клієнта (за власною ініціативою).

Опитування локальних вузлів обліку здійснює комунікаційний сервер під керуванням сервера БД. В якості сервера БД і комунікаційного сервера використовується сервер промислового виготовлення з обов'язковим дублюванням і резервуванням комерційної інформації.

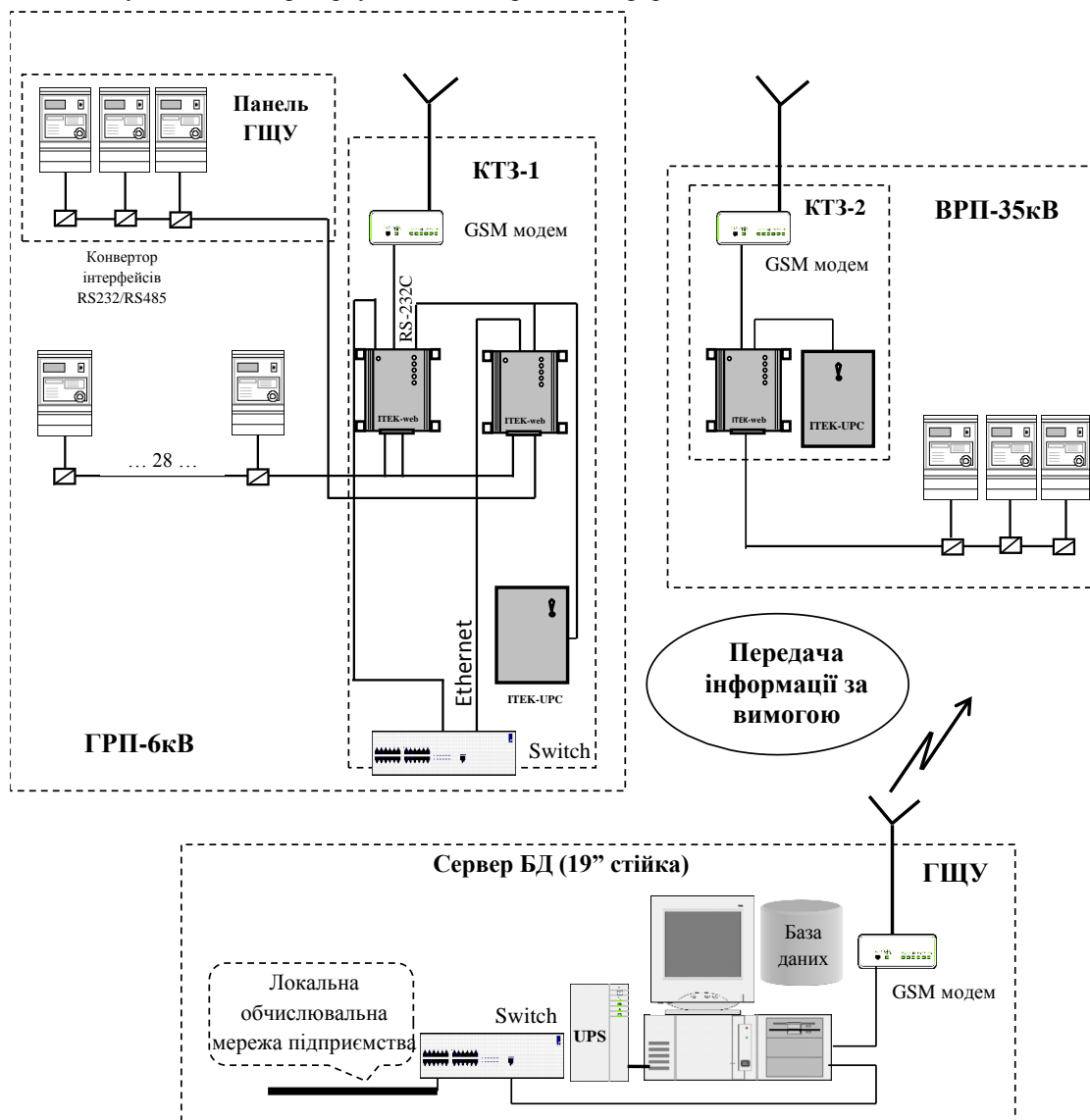


Рисунок 1. Архітектура АСКОЕ великого промислового об'єкта

Спеціальне програмне забезпечення верхнього рівня «Електро» (рис. 2) виконує опитування багатофункціональних лічильників електроенергії, вносить до БД інформацію про споживання електроенергії та споживаної потужності, веде базу вимірюваних параметрів якості електричної енергії, виконує функції зберігання і резервування БД, синхронізації системного часу, документування, тощо.

Традиційний парк вимірювальних приладів відкалібровано при частоті 50 Гц. Ціла низка досліджень, проведена з різними лічильниками електроенергії, показала істотне зростання похибки обліку зі зростанням рівня вищих гармонійних складових струму та напруги [1–5].

Для підвищення точності обліку та розподілу відповідальності за порушення гармонійного складу електроенергії виникає необхідність створення принципово нової розподіленої мікропроцесорної системи обліку електроенергії з використанням технології розподілених вимірювань, яка дозволить в єдиному «абсолютному» часі визначати величину та напрямок потужності різних гармонік для кожного елемента електричної мережі за принципами, зазначеними в [6].

Для створення системи контролю за якістю електроенергії з функцією ідентифікації джерел гармонійних спотворень та визначення ступеня участі елементів електричної мережі у розподілі потужності вищих гармонік потрібна модифікація алгоритмів роботи лічильників електроенергії.

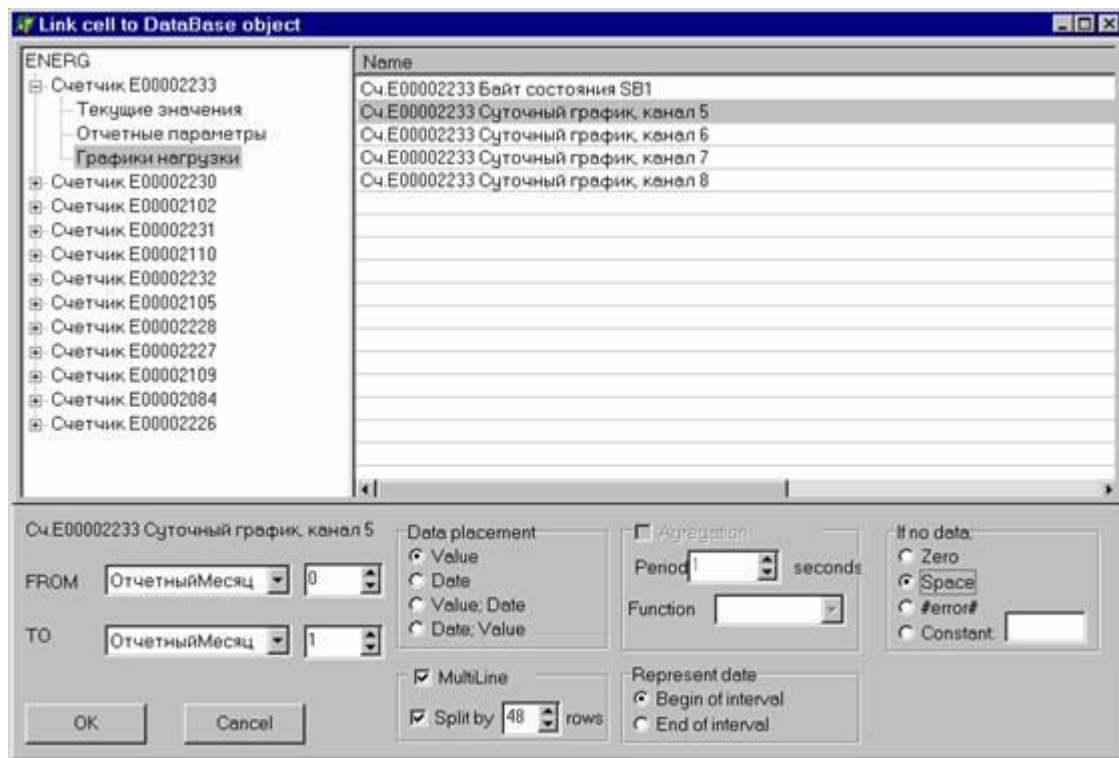


Рисунок 2. Вікно оболонки системи «Електро»

Більшість сучасних електронних лічильників виготовляються на базі надвеликих великих інтегральних схем (НВІС) виробництва фірми Analog Devices. Ці комплектуючі мають різний набір функцій, які визначають сферу їх застосування (однофазні лічильники, трифазні лічильники тощо) і ціну. Серед них є серія НВІС з можливістю моніторингу параметрів якості електроенергії, зокрема обчислення THD (Total Harmonic Distortion) по трьох вимірювальних каналах струму та напруги. Наприклад, ADE9000 [8] та сімейство ADE78xx [9]. До їх особливих функціональних можливостей відноситься наявність гнучкого буфера для зберігання вибірок сигналів струму та напруги з метою подальшої обробки їх зовнішнім сигнальним процесором відповідно до ДСТУ ІЕС 61000-4-7:2012. У буфері зберігається від 8 до 80 мс інформації по кожному з каналів струму та напруги залежно від частоти дискретизації. Для передачі даних на зовнішній сигнальний процесор передбачено спеціальний високошвидкісний інтерфейс HSDC (High Speed Data Capture). У складі НВІС лічильників електроенергії інтегрований сигнальний процесор, але його можливості обмежені. Для розширення функціональних можливостей НВІС лічильника електроенергії передбачено можливість його підключення до зовнішнього сигнального процесора (DSP).

Подальший гармонійний аналіз сигналів струму та напруги проводиться зовнішнім сигнальним процесором за алгоритмом, наведеним на рис. 3.

Для кожного n -го основного інтервалу вимірювання (10 періодів гармоніки основної частоти [9]) здійснюються вибірки сигналів струму $i_n(t)$ і напруги $u_n(t)$. Потім аналізується їх спектральний склад за допомогою ШПФ. В підсумку для n -го основного інтервалу вимірювання формуються матриці спектрів струму \mathbf{I}_n і напруги \mathbf{U}_n . Потім порівнюються значення елементів матриць спектрів струму і напруги з внесеними в пам'ять пристрою відповідними допустимими значеннями струму $I_{\text{кдоп}}$ і напруги $U_{\text{кдоп}}$ для кожної k -ї гармонічної складової.

За відповідності значень гармонійних складових допустимим нормам ($I_k \leq I_{k\text{доп}}$, $U_k \leq U_{k\text{доп}}$) проводиться вибірка сигналів струму $i_{n+1}(t)$ і напруги $u_{n+1}(t)$ для наступного $(n+1)$ -го основного інтервалу вимірювання і цикл спектрального аналізу повторюється. У разі перевищення значень гармонійних складових струму і/або напруги допустимих норм ($I_k > I_{k\text{доп}}$, $U_k > U_{k\text{доп}}$) проводиться детальний спектральний аналіз по гармонійним складовим, значення яких перевищують допустимі норми, з використанням алгоритму ДПФ по періодам [10]. Далі обчислюється активна потужність k -ї гармоніки на n -му основному інтервалі вимірювання P_{kn} і наростаючим підсумком енергія k -ї гармоніки A_k . Отримані результати і мітка часу, відповідна n -му основному інтервалу вимірювання, в який виникло порушення параметрів якості електричної енергії, зберігаються в пам'яті лічильника для передачі на верхній рівень АСКОЕ, який залежить від конфігурації самої системи обліку електроенергії.

Кабельні лінії та трансформатори є споживачами активної потужності гармонійних складових і, відповідно, для складання балансу потужностей гармонійних складових треба враховувати цей фактор [11]. Для цього необхідно проводити вимірювання на їх обох кінцях, тобто в точці підключення до мережі живлення та з боку споживача.

Визначення винуватців гармонійних спотворень та ступеня участі суб'єктів електричної мережі у розподілі потужності вищих гармонік починається на рівні ЛПЗОД – у мікросервері ІТЕК-web передбачено можливість обчислення потужності вищих гармонік для «транзитних» елементів електричної мережі (трансформатори, кабельні лінії). Також розрахунок потужності вищих гармонік для «транзитних» елементів електричної мережі може виконуватись ПЗ верхнього рівня при безпосередньому підключенні лічильників до сервера БД та/або конфігурації мікросервера ІТЕК-web в режим «прозорій» передачі даних з лічильників на сервер БД. Блок-схему алгоритму обчислення потужності вищих гармонік для «транзитних» елементів електричної мережі наведено на рис. 4.

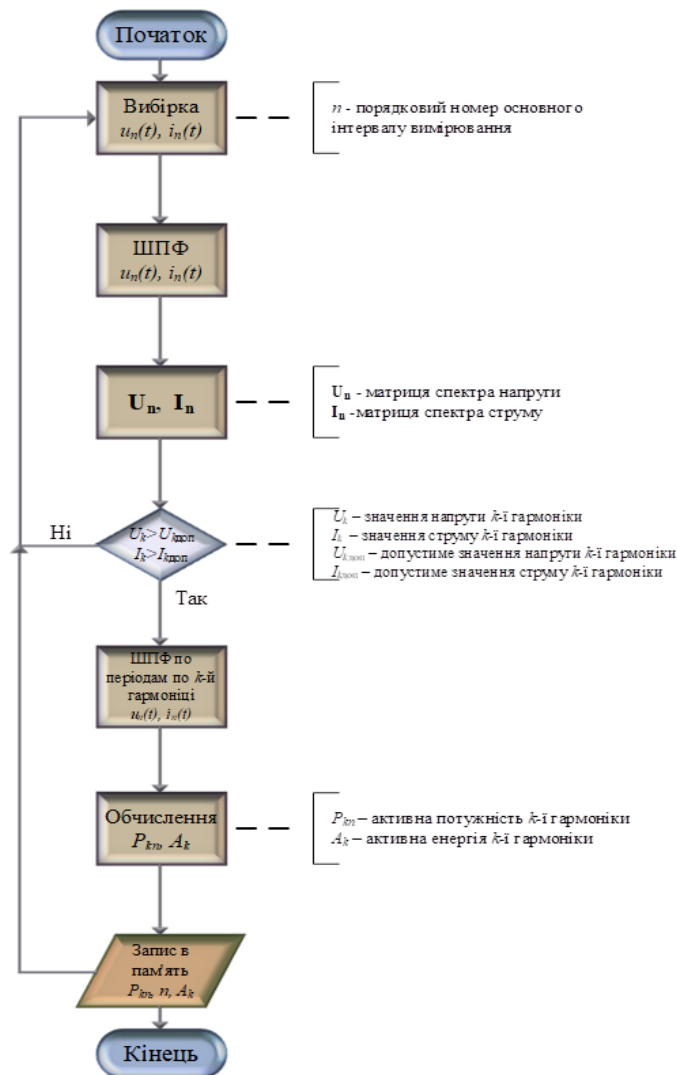


Рисунок 3. Блок-схема алгоритму аналізу сигналів струму і напруги лічильником

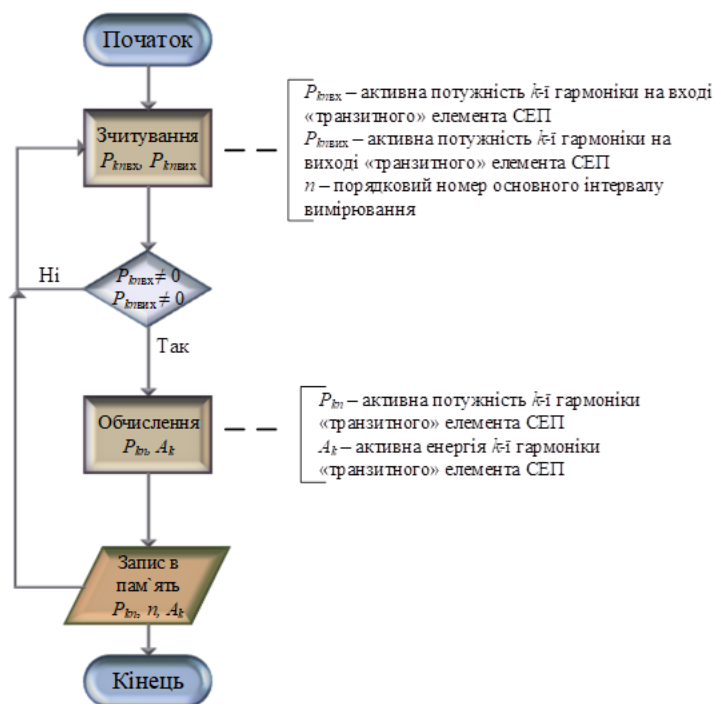


Рисунок 4. Блок-схема алгоритму обчислення потужності вищих гармонік для «транзитних» елементів СЕП

Отримані з лічильників дані щодо потужності та енергії вищих гармонік обробляються ПЗ верхнього рівня та заносяться до шаблону звітних форм (рис. 5). З розрахункових даних із графікам потужностей вищих гармонік у різних точках електричної мережі розробляється перелік заходів щодо підвищення якості електроенергії.

№ п/п	Приєднання	осн/дубл	прием/отдача	№ ліч.	Показання лічильника			Коеф.
					місяць	дата	поточні	
	110кВ							
18	1 АТ-1 110кВ		прм	0001391998				2
19	2 АТ-1 110кВ		отд	0001391998				2
20	3 АТ-2 110кВ		прм	0001001475				2
21	4 АТ-2 110кВ		отд	0001001475				2
22	5 ОВ 110		прм	0001391999				2
23	6 ОВ 110		отд	0001391999				2

Рисунок 5. Шаблон звіту ПЗ «Електро» на базі MS Excel

Висновки:

- з наявним на сьогодні парком лічильників неможливо достовірно визначити джерело гармонійних спотворень;
- для вирішення завдань контролю якості електроенергії та визначення ступеня участі кожного елемента електричної мережі у розподілі потужності вищих гармонік доцільно використовувати АСКОЕ з можливістю обліку потужності та енергії вищих гармонік;
- необхідне розширення функціональних можливостей лічильників електроенергії з метою реєстрації інформації щодо потужності та енергії вищих гармонік у точці обліку;
- потрібно розширення функціональних можливостей локальних пристроїв збору та обробки даних з метою розрахунку потужності та енергії вищих гармонік для «транзитних» елементів електричної мережі.

1.Список використаної літератури

1. Ю. С. Железко, *Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: Руководство для практических расчетов*, М.: ЭНАС, 2009.
2. В. В. Киселев, И. С. Пономаренко, “Влияние несинусоидальности напряжения и тока на показания электронных счетчиков электроэнергии”, *Промышленная энергетика*, №2, с. 40-45, 2004.
3. В. С. Соколов, “Как работают электросчетчики при низком качестве энергии” [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.autex.spb.su/automation/lcard/sokolov-2004.pdf>
4. Е. Г. Акимов, А. И. Шулешко, “Индукционные и электронные счетчики – что лучше?”, *Энергосбережение*, №5, с. 32–35, 2005.
5. А. В. Волошко, Д. В. Филянин, “Влияние качества электроэнергии на точность показаний электросчетчиков: обзор исследований”, *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського*, Випуск 4(87), с. 38–43, 2014.
6. D. Filyanin, “Identification of harmonic distortion sources in distribution systems using the discrete fourier transform on periods” *Енергетика: економіка, технології, екологія*, №2, с. 110-119, 2018.
7. Analog Devices, “High Performance, Multiphase Energy, and Power Quality Monitoring IC”, ADE9000 datasheet Rev. A, 2017.
8. Analog Devices, “Polyphase Multifunction Energy Metering IC with Harmonic and Fundamental Information”, ADE7854/ADE7858/ADE7868/ADE7878 datasheet Rev. H, 2014.
9. *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-30: Testing and measurement techniques – Power quality measurement methods*, IEC 61000-4-30:2008 Approved 30 April 2009.
10. А. В. Волошко, Д. В. Филянин, “Применение алгоритмов Быстрого Преобразования Фурье и Дискретного Преобразования Фурье для обнаружения, локализации и оценки синусоидальности кривых тока и напряжения” *Енергетика: економіка, технології, екологія*, №3, с. 87–94, 2017.
11. А. В. Волошко, Д. В. Филянин, “Определение источников искажения и степени участия каждого субъекта системы электроснабжения в распределении мощности высших гармоник” *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Технічні науки. Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України*, Вып.165, с. 14–15, 2015.

D. Filyanin¹, Cand. Sc. (Eng.), assistant, ORCID 0000-0003-3576-3633

V. Kalinchyk¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0003-4028-0185

O. Meita¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0002-4132-5202

A. Voloshko¹, Dr. Sc. (Eng.), Prof., ORCID 0000-0002-6867-2060

V. Pyriatynskiy¹, student, ORCID 0000-0002-5673-8958

¹National Technical University of Ukraine

"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

APPLICATION OF ASCA TO SOLVE THE PROBLEMS OF HARMONIC DISTORTIONS SOURCES IDENTIFICATION

One of the most important components of the electricity market is its instrumental support, which is a set of systems, instruments, devices, communication channels, algorithms, etc. To control and manage the parameters of energy consumption and energy supply. The basis for the formation and development of instrumental support is the automated systems of commercial account of electric power (ASCA). In addition to the tasks of monitoring energy consumption and power supply, it is also advisable to use ASCA to solve the tasks of monitoring the power quality, identifying the culprits of harmonic distortions and determination the degree of participation of each element of the distribution system in the distribution of higher harmonics power in order to improve the quality and reliability of power supply consumers and adjust the amount of payment for consumed electricity. This paper discusses the issues of the possibility of ASCA for monitoring the harmonic set of voltage and current curves in

distribution systems in order to identify and assess of harmonic distortion sources. The block diagram of an industrial facility ASCA and its main components are considered. An algorithm for expanding the functionality of electricity meters is proposed, which makes it possible to control the harmonic composition of the supplied power, to register the power and energy of higher harmonics. Considered are the issues of using counters with recording the power and energy of higher harmonics as part of the ASCA.

Key words: ASKUE, power quality, higher harmonics, power of higher harmonics, harmonics source.

References

- 1.Yu. S. Zhelezko, *Poteri elektroenergii. Reaktivnaya moschnost. Kachestvo elektroenergii: Rukovodstvo dlya prakticheskikh raschetov* [Power loss. Reactive power. Power quality: practical calculations guide], ENAS, Moscow, Russia, 2009.
- 2.V. V. Kiselev, I. S. Pnomarenko, “Vliyanie nesinusoidalnosti napryazheniya i toka na pokazaniya elektronnyih schetchikov elektroenergii [Effect of non-sinusoidal voltage and current readings of digital electricity meters]”, *Promishlennaya Energetika*, no. 2, pp. 40-45, 2004.
- 3.V. S. Sokolov, Kak rabotayut elektroschetchiki pri nizkom kachestve energii [How electric power counters operate at low power quality], Available at: <http://www.autex.spb.su/automation/lcard/sokolov-2004.pdf>
- 4.E. G. Akimov, A. I. Shuleshko, “Induktsionnyie i elektronnyie schetchiki – chto luchshe? [Induction and electronic countrs – which is better?]”, *Energoberegenie*, no. 5, pp. 32–35, 2005.
- 5.A. V. Voloshko, D. V. Filyanin, “ Vliyanie kachestva elektroenergii na tochnost pokazaniy elektroschetchikov: obzor issledovaniy [The impact of power quality on the accuracy of meter reading: a review of studies]”, *Transactions of Kremenichuk Mykhailo Ostrohradskiy National University*, vol. 4, no. 87, pp. 38–43, 2014.
- 6.D. Filyanin, “Identification of harmonic distortion sources in distribution systems using the discrete fourier transform on periods” *Енергетика: економіка, технології, екологія*, №2, с. 110-119, 2018.
- 7.Analog Devices, “High Performance, Multiphase Energy, and Power Quality Monitoring IC”, ADE9000 datasheet Rev. A, 2017.
- 8.Analog Devices, “Polyphase Multifunction Energy Metering IC with Harmonic and Fundamental Information”, ADE7854/ADE7858/ADE7868/ADE7878 datasheet Rev. H, 2014.
- 9.*Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-30: Testing and measurement techniques – Power quality measurement methods*, IEC 61000-4-30:2008 Approved 30 April 2009.
- 10.A. Voloshko, D. Filyanin, “Detection and localizatin of power quality disturbanses based on fast fourier transform and discrete fourier transform”, *POWER ENGINEERING: Economics, Technique, Ecology*, no. 3, pp. 87–94, 2017.
- 11.A. Voloshko, D. Filyanin, “Ddistortion source identification and impact of each subjects of power supply system at harmonics power distribution”, *Bulletin of the Kharkiv National Technical University of Agriculture. Petro Vasilenko. Technical sciences. "Problems of energy supply and energy saving in the agroindustrial complex of Ukraine"*, no. 165, pp. 14–15, 2015.

Надійшла: 4.02.2023
Received: 4.02.2023

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ КЕРУВАННЯ ПЕРЕТВОРЮВАЧЕМ ВЕНТИЛЬНОГО ДВИГУНА

Розроблено методику вибору електрообладнання вентиляного двигуна з машинною комутацією, що враховує способи керування інвертором. Встановлена потужність електрообладнання вентиляного двигуна (ВД) визначається технологічними вимогами і залежить від структури перетворювача, способу комутації ключів перетворювача та способів керування інвертором. Застосування автономних інверторів зі штучною комутацією, ключі яких комутуються за рахунок реактивної енергії, накопиченої в додаткових комутаційних пристроях, підвищує коефіцієнт використання синхронної машини. Однак у цьому випадку ускладнюється схема і зростає встановлена потужність перетворювача. Використання транзисторів IGBT і тиристорів IGCT призводить до значного зростання вартості устаткування.

Для зменшення впливу випрямляча ВД на мережу й узгодження напруги привода з напругою живлення може виникнути необхідність в узгоджувальному трансформаторі і пристрої компенсації реактивної потужності. На величину потужності цього устаткування впливає спосіб керування випрямлячем, характер навантаження двигуна і діапазон зміни швидкості.

Регулювання напруги випрямляча може бути симетричним і несиметричним. Відомо декілька способів несиметричного регулювання, серед яких одним з найдоцільніших є почергове. У випадку почергового керування в трифазній мостовій схемі створюється штучний нульовий контур, внаслідок чого тривалість протікання струму по вторинних обмотках трансформатора стає меншою 2/3 напівперіоду живлячої напруги. Крім цього, підвищуються також енергетичні показники, зокрема зменшується споживання реактивної потужності та збільшуються коефіцієнти зсуву і потужності.

Ключові слова: вентиляний двигун, випрямляч, інвертор, тиристорний перетворювач, способи керування випрямлячем

Вступ. Застосування залежних інверторів струму з машинною комутацією (рис.1), ключі яких комутуються за рахунок електрорушійної сили (ЕРС) двигуна, викликає деяке зниження коефіцієнта використання, але дозволяє значно спростити силову схему, зменшити потужність устаткування і вартість електропривода [1, 2].

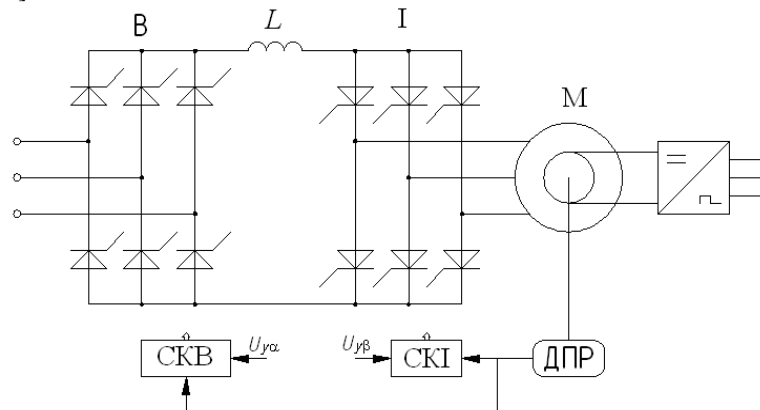


Рисунок 1 - Схема ВД з інвертором струму з машинною комутацією: В – випрямляч; І – інвертор; ДПР – датчик положення ротора; СКВ, СКІ – відповідно системи керування випрямлячем та інвертором

Машинна комутація в ВД виконується з випереджаючим струмом, фазовий зсув якого відносно ЕРС статора задає СКІ за допомогою кута випередження β . Кут β визначається сумою кутів комутації γ і запасу δ . Мінімальне значення кута випередження обмежується комутаційною стійкістю інвертора, а максимальне - зниженням коефіцієнта використання.

У таблиці наведені розрахункові дані щодо вибору ВД і тиристорного інвертора струму залежно від способів керування ($\beta = 60^\circ$, $\beta = 50^\circ$, $\beta_{\min} = f(\gamma)$ за умови $\delta = 10^\circ$) для заданої потужності $P = 3000$ кВт. У розрахунку річної витрати електроенергії прийнято, що технологічна установка працює безперервно протягом року.

Таблиця. Дані для вибору ВД і тиристорного інвертора залежно від способів керування

Параметр	$\beta=60^\circ$	$\beta=50^\circ$	$\beta_{\min}=f(\gamma)$ за умови $\delta_{\min}=10^\circ$
P , кВт	3000	3000	3000
$C_{\Gamma\max}$	2	1,781	1,4
$P_{\text{ВД}}$, кВт	6000	5343	4200
U_n , В	6000	6000	6000
k_c	0,67	0,82	0,93
I_n , А	861	627	435
I_d , А	1076	784	544
$U_{d\max}$, В	8100	8100	8100
Тип тиристора	T-500-15		T-320-15
N , шт.	8	8	8
M , шт.	1	1	1
$I_d U_{do}$, кВА	8716	6350	4406
W , кВт·год	52560000	38292335	26569453

Потужність ВД порівняно з потужністю двигуна з синусоїдальним живленням визначається коефіцієнтом габаритної потужності. Максимум функції $C_2 = f(\beta, \gamma)$ визначає розрахункову потужність двигуна. Залежність коефіцієнта габаритної потужності ВД від кутових параметрів зображена на рис. 2. Так для способу керування $\beta = 60^\circ$ і $\beta_{\min}=f(\gamma)$ відповідно маємо 2 і 1,4.

Розрахункова потужність двигуна у схемі ВД визначається виразом

$$P_{\text{ВД}} = PC_{\Gamma\max}.$$

Номинальний струм двигуна визначається з формул:

- для способу керування $\beta = \text{const}$

$$I_n = \frac{P_n}{\sqrt{3}U_n \cos\left(\beta - \frac{\gamma_n}{2}\right)};$$

- для способу керування $\beta_{\min}=f(\gamma)$ за умови $\delta_{\min}=\text{const}$

$$I_n = \frac{P_n}{\sqrt{3}U_n \cos\left(\delta_{\min} + \frac{\gamma_n}{2}\right)}.$$

Залежності коефіцієнту зсуву $k_c = \cos\left(\beta - \frac{\gamma}{2}\right)$ або $k_c = \cos\left(\delta_{\min} - \frac{\gamma}{2}\right)$ ВД від кутових параметрів і

способів керування наведені на рис.3.

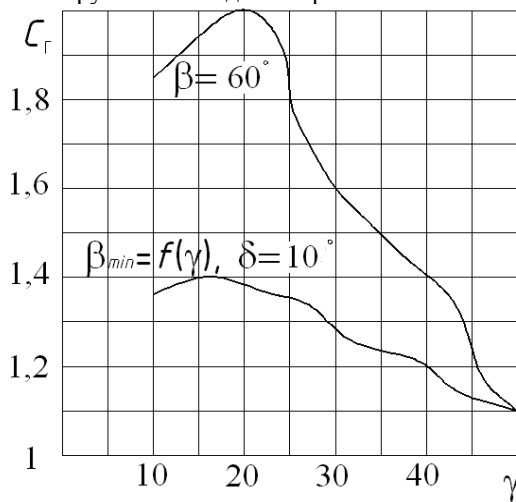


Рисунок 2 - Залежність коефіцієнту габаритної потужності ВД від кутових параметрів

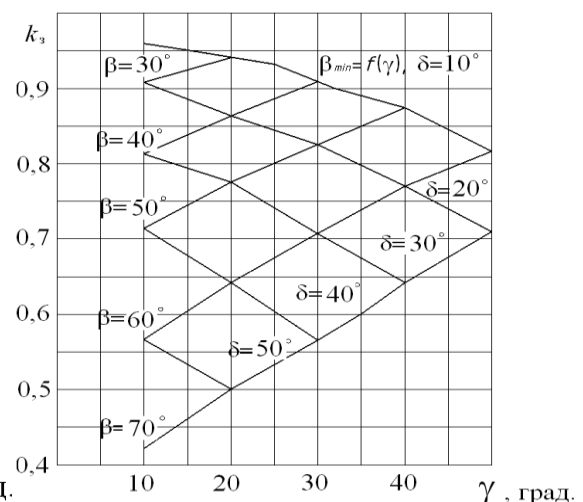


Рисунок 3 - Залежність коефіцієнту зсуву ВД від кутових параметрів

Середнє значення струму у вентиляльному перетворювачі

$$I_d = \frac{\pi\gamma}{2\sqrt{3}\sin\frac{\gamma}{2}} I_n$$

Вибір тиристорного перетворювача за відомої схеми зводиться до вибору типу і параметрів тиристорів. Для мостових трифазних схем максимальна величина середнього значення випрямленої напруги U_{do} , номінальна лінійна напруга двигуна U_n і лінійна напруга мережі U_c пов'язані в такий спосіб

$$\frac{U_{do}}{U_n} = \frac{U_{do}}{U_c} = 1,35$$

Кількість послідовно сполучених ключів у плечі моста інвертора

$$N \geq \frac{U_{do}}{U_T} k_{zu}$$

де U_T — припустима напруга на тиристорі (клас напруги); $k_{zu} = 1,5...2$ — коефіцієнт запасу по напрузі.

Кількість паралельних гілок

$$M \geq \frac{I_{d\max}}{3I_{dr}} k_{zi}$$

де I_d — середнє значення струму ключа; $k_{zi} = 1,5...2$ - коефіцієнт запасу по струму.

Для першого варіанту можна використовувати тиристори п'ятнадцятого класу Т-500, для другого - Т-320.

Габаритна потужність інвертора $P_1 = I_d U_{do}$, кВА.

Витрати електроенергії за рік, кВт·год/рік $W = k_0 P_1 T$, де T - число годин роботи приводу за рік, год/рік; k_0 - коефіцієнт, який враховує втрати енергії під час зупинки приводу.

Регулювання напруги випрямляча може бути симетричним і несиметричним. Відомо декілька способів несиметричного регулювання, серед яких одним з найдоцільніших є почергове [2, 3]. У випадку почергового керування в трифазній мостовій схемі створюється штучний нульовий контур, внаслідок чого тривалість протікання струму по вторинних обмотках трансформатора стає меншою 2/3 напівперіоду живлячої напруги. Крім цього, підвищуються також енергетичні показники, зокрема зменшується споживання реактивної потужності та збільшуються коефіцієнти зсуву і потужності.

Симетричне керування групами ключів випрямляча характеризується тим, що кути керування α_1 і α_2 дорівнюють один одному і змінюються в межах $0 \leq \alpha \leq \pi - \beta_{\min}$. У "першому" почерговому способі

$$\alpha_{1\min}^I = 0, \frac{\pi}{6} \leq \alpha_2^I \leq \pi - \beta_{\min}, \text{ у "другому" } - \alpha_{1\min}^{II} = \frac{\pi}{6}, \frac{\pi}{6} \leq \alpha_2^{II} \leq \pi - \beta_{\min}$$

Для механізмів з вентиляторним навантаженням залежність моменту опору від швидкості

$$M_c = M_{c\max} \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 \quad (1)$$

Аналітичний вираз електромагнітного моменту ВД за умови нехтування активним опором [4]

$$M = \frac{3}{2} p \frac{U_{m(1)}^2 \cos(\beta - \frac{\gamma}{2}) \sin\theta}{\omega^2 L_q \cos(\beta_0 - \frac{\gamma}{2})} \quad (2)$$

де $U_{m(1)}$ - амплітудне значення першої гармоніки напруги; $\beta_0 = \beta + \theta$; β_0, β - кути випередження; θ - кут навантаження синхронного двигуна; $\beta = \gamma + \delta$; γ - кут комутації; δ - кут запасу; p - число пар полюсів; L_q - індуктивність двигуна по поперечній осі. З урахуванням максимального значення моменту [2, 5]

$$M_{\max} = \frac{3}{2} p \frac{U_{m(1)}^2 \cos(\beta - \frac{\gamma}{2})}{4\omega r}$$

рівняння (2) записуємо таким чином

$$M = M_{\max} \frac{4r \sin\theta}{\omega L_q \cos(\beta_0 - \frac{\gamma}{2}) \cos(\beta - \frac{\gamma}{2})} \quad (3)$$

де r - активний опір двигуна ВД.

$$\text{Розв'язуючи рівняння (1) і (3), знаходимо } \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 = \frac{4r\sin\theta}{\mu X_q \cos(\beta_0 - \frac{\gamma}{2}) \cos(\beta - \frac{\gamma}{2})} \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^{-1}, \quad (4)$$

$$\text{де } \mu = \frac{M_{\text{смах}}}{M_{\text{макс}}}.$$

Нехтуючи падінням напруги на ключах і вважаючи, що механічні характеристики ВД є абсолютно жорсткими, отримуємо залежно від способу керування наступні вирази

$$\frac{\omega}{\omega_0} = v \cos\alpha; \quad \frac{\omega}{\omega_0} = 0,5v(1 + \cos\alpha_2^I); \quad \frac{\omega}{\omega_0} = 0,5v\left(\frac{\sqrt{3}}{2} + \cos\alpha_2^{II}\right), \quad (5)$$

$$\text{де } v = \frac{k_{\text{сх.в}} U_{\text{т}}}{k_{\text{сх.і}} E \cos\beta}; \quad U_{\text{т}}, \quad E - \text{відповідно діюче значення вторинної напруги трансформатора та}$$

електрорушійної сили ВД; $k_{\text{сх.в}} = k_{\text{сх.і}} = 1,35$ – відповідно коефіцієнти схем випрямляча і інвертора.

Розв'язуючи спільно рівняння (4) і (5), визначаємо кути керування

$$\alpha = \arccos\sqrt{G\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^{-1}}; \quad \alpha_2^I = \arccos\left(2\sqrt{G\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^{-1}} - 1\right); \quad \alpha_2^{II} = \arccos\left(2\sqrt{G\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^{-1}} - \frac{\sqrt{3}}{2}\right), \quad (6)$$

$$\text{де } G = \frac{4r\sin\theta}{v\mu X_q \cos(\beta_0 - \frac{\gamma}{2}) \cos(\beta - \frac{\gamma}{2})}.$$

Вирази (6) дозволяють знаходити кути керування в залежності від швидкості і внутрішніх параметрів ВД з похибкою, яка не перевищує 1...3 %.

Рівняння (1) записуємо для струмів ВД у вигляді

$$I_d = I_{\text{dmax}} \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2,$$

де I_d - середнє значення струму ВД.

Тоді діюче значення вторинного струму трансформатора $I_{\text{т}}$ залежно від способу керування визначимо таким чином [2]

$$I_{\text{т}} = I_d \sqrt{\frac{2}{3}} = I_{\text{dmax}} \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 \sqrt{\frac{2}{3}}; \quad I_{\text{т}}^I = I_{\text{dmax}} \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 \sqrt{1 - \frac{\alpha_2^I}{\pi}}; \quad I_{\text{т}}^{II} = I_{\text{dmax}} \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 \sqrt{\frac{\pi - \alpha_{1\text{min}}^I - \alpha_2^{II}}{\pi}}. \quad (7)$$

Перетворювач ВД механізмів з вентиляторним навантаженням зазвичай працює у випрямному режимі, а діапазон регулювання швидкості не перевищує 2:1, тому спільне розв'язання рівнянь (5) і (7) дозволяє отримати вирази для діючого значення вторинного струму трансформатора в такому вигляді [6, 7]

$$I_{\text{т}} = I_{\text{dmax}} F(\alpha); \quad I_{\text{т}}^I = I_{\text{dmax}} F_I(\alpha_2^I); \quad I_{\text{т}}^{II} = I_{\text{dmax}} F_{II}(\alpha_2^{II}), \quad (8)$$

$$\text{де } F(\alpha) = v^2 \cos^2 \alpha \sqrt{\frac{2}{3}}; \quad F_I(\alpha_2^I) = \frac{v^2}{4} (1 + \cos\alpha_2^I)^2 \sqrt{1 - \frac{\alpha_2^I}{\pi}}; \quad F_{II}(\alpha_2^{II}) = \frac{v^2}{4} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} + \cos\alpha_2^{II}\right)^2 \sqrt{\frac{5 - \alpha_2^{II}}{6 - \pi}}.$$

Або, підставляючи у вирази (8) значення α , α_2^I і α_2^{II} з виразів (6), знаходимо

$$I_{\text{т}} = I_{\text{dmax}} F\left(G, \frac{\omega}{\omega_0}\right); \quad I_{\text{т}}^I = I_{\text{dmax}} F_I\left(G, \frac{\omega}{\omega_0}\right); \quad I_{\text{т}}^{II} = I_{\text{dmax}} F_{II}\left(G, \frac{\omega}{\omega_0}\right), \quad (9)$$

$$\text{де } F\left(G, \frac{\omega}{\omega_0}\right) = \sqrt{\frac{2}{3}} v^2 \cos^2 \arccos\sqrt{G\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^{-1}};$$

$$F_I\left(G, \frac{\omega}{\omega_0}\right) = \frac{v^2}{4} [1 + (2\sqrt{G\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^{-1}} - 1)]^2 \sqrt{1 - [\arccos(2\sqrt{G\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^{-1}} - 1)]/\pi};$$

$$F_{II}(G, \frac{\omega}{\omega_0}) = \frac{v^2}{4} \left[\frac{\sqrt{3}}{2} + (2\sqrt{G(\frac{\omega}{\omega_0})^{-1}} - \frac{\sqrt{3}}{2})^2 \sqrt{\frac{5}{6} - [\arccos(2\sqrt{G(\frac{\omega}{\omega_0})^{-1}} - \frac{\sqrt{3}}{2})] / \pi} \right]$$

Вирази (8) і (9) мають сенс для кутів

$$0 \leq \alpha \leq \pi - \beta_{\min}; \quad \alpha_{I\min}^I = 0; \quad \frac{\pi}{6} \leq \alpha_2^I \leq \frac{2}{3}\pi; \quad \alpha_{I\min}^{II} = \frac{\pi}{6}; \quad \frac{\pi}{6} \leq \alpha_2^{II} \leq \frac{2}{3}\pi. \quad (10)$$

Найбільшому діючому значенню струму I_T , яке визначає розрахункову потужність трансформатора, відповідає максимум функцій $F_m(\alpha)$, $F_{Im}(\alpha_2^I)$, $F_{II m}(\alpha_2^{II})$ або $F_m(G, \frac{\omega}{\omega_0})$, $F_{Im}(G, \frac{\omega}{\omega_0})$, $F_{II m}(G, \frac{\omega}{\omega_0})$. Причому

функції $F(\alpha)$, $F_I(\alpha_2^I)$ і $F_{II}(\alpha_2^{II})$ дозволяють визначити величину струму трансформатора залежно від кутів керування, а $F(G, \frac{\omega}{\omega_0})$, $F_I(G, \frac{\omega}{\omega_0})$, $F_{II}(G, \frac{\omega}{\omega_0})$ - від швидкості й внутрішніх параметрів ВД.

З виразів (8) видно, що максимуму функцій $F_m(\alpha)$, $F_{Im}(\alpha_2^I)$, $F_{II m}(\alpha_2^{II})$ відповідають кути керування $\alpha = 0$ і $\alpha_2^I = \alpha_2^{II} = 30^\circ$. Для реальних параметрів ($\beta_0 = 60^\circ$, $\beta = 40^\circ \dots 45^\circ$, $\gamma = 15^\circ \dots 20^\circ$, $\theta = 15^\circ \dots 20^\circ$, $X_q = 1 \dots 1,2$) за умови розрахункової потужності ВД 3000 кВт маємо $F_m(\alpha) = 0,817$, $F_{Im}(\alpha_2^I) = 0,711$ і $F_{II m}(\alpha_2^{II}) = 0,612$. Потужність узгоджувального трансформатора за симетричного керування складе

$$S_T = \sqrt{3} U_T I_{d\max} [F_m(\alpha) \text{ чи } F_m(G, \frac{\omega}{\omega_0})] = 4492 \text{ кВт},$$

що значно перевищує потужності трансформаторів, розрахованих для почергових способів ($S_T^I = 3909$ кВА; $S_T^{II} = 3365$ кВА).

Повну потужність ВД знаходимо на основі інтегральних методів $S = \sqrt{P^2 + Q^2 + P_c^2}$.

Остаточні вирази для активної потужності і потужності спотворення мають вигляд

$$P = \sqrt{3} U_T I_{d\max} v^2 \cos^3 \alpha \sqrt{\frac{2}{3}}; \quad P^I = \sqrt{3} U_T I_{d\max} \frac{v^2}{8} (1 + \cos \alpha_2^I)^3 \sqrt{1 - \frac{\alpha_2^I}{\pi}};$$

$$P^{II} = \sqrt{3} U_T I_{d\max} \frac{v^2}{8} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} + \cos \alpha_2^{II} \right)^3 \sqrt{\frac{5}{6} - \frac{\alpha_2^{II}}{\pi}}; \quad (11)$$

$$P_c = \sqrt{3} U_T I_{d\max} v^2 \cos^2 \alpha \sqrt{\frac{2}{3} \left(\frac{1}{k_c^2} - 1 \right)}; \quad P_c^I = \sqrt{3} U_T I_{d\max} \frac{v^2}{4\sqrt{2}} (1 + \cos \alpha_2^I)^{2,5} \sqrt{\left(1 - \frac{\alpha_2^I}{\pi} \right) \left(\frac{1}{k_c^2} - 1 \right)};$$

$$P_c^{II} = \sqrt{3} U_T I_{d\max} \frac{v^2}{4\sqrt{2}} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} + \cos \alpha_2^{II} \right)^2 \sqrt{\left(\frac{5}{6} - \frac{\alpha_2^{II}}{\pi} \right) \left(\frac{1}{k_c^2} - 1 \right) (1,75 + \sqrt{3} \cos \alpha_2^{II})}. \quad (12)$$

Споживана з мережі реактивна потужність залежить як від способу мережного управління, так і від діапазону регулювання

$$Q = \sqrt{3} U_T I_{d\max} \left[F'(\alpha) \text{ або } F'(G, \frac{\omega}{\omega_0}) \right]; \quad Q^I = \sqrt{3} U_T I_{d\max} \left[F'_I(\alpha_2^I) \text{ або } F'_I(G, \frac{\omega}{\omega_0}) \right];$$

$$Q^{II} = \sqrt{3} U_T I_{d\max} \left[F'_{II}(\alpha_2^{II}) \text{ або } F'_{II}(G, \frac{\omega}{\omega_0}) \right], \quad (13)$$

де $F'(\alpha) = v^2 \cos^2 \alpha \sin \alpha \frac{\sqrt{3}}{2}$; $F'(G, \frac{\omega}{\omega_0}) = v^2 \cos^2 \arccos \sqrt{G(\frac{\omega}{\omega_0})^{-1}} \sin^2 \arccos \sqrt{G(\frac{\omega}{\omega_0})^{-1}} \sqrt{\frac{2}{3}}$;

$$F'_I(\alpha_2^I) = \frac{v^2}{8} (1 + \cos \alpha_2^I)^2 \sin \alpha_2^I \sqrt{1 - \frac{\alpha_2^I}{\pi}}; \quad F'_I(G, \frac{\omega}{\omega_0}) = \frac{v^2}{2} G \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^{-1} \sin \arccos \left(2 \sqrt{G \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^{-1}} - 1 \right) \times$$

$$\times \sqrt{1 - \left[\arccos \left(2 \sqrt{G \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^{-1}} - 1 \right) \right] / \pi}; F''_m(\alpha_2^{\prime\prime}) = \frac{v^2}{8} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} + \cos \alpha_2^{\prime\prime} \right)^2 \sin \alpha_2^{\prime\prime} \sqrt{\frac{5}{6} - \frac{\alpha_2^{\prime\prime}}{\pi}};$$

$$F''_m \left(G, \frac{\omega}{\omega_0} \right) = \frac{v^2}{2} G \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^{-1} \operatorname{sinarccos} \left(2 \sqrt{G \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^{-1}} - \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \times \sqrt{\frac{5}{6} - \left[\arccos \left(2 \sqrt{G \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^{-1}} - \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \right] / \pi}.$$

Вирази (11) - (13) мають сенс за дотримання умов (10).

Потужність компенсуючих конденсаторів визначається максимальним значенням реактивної потужності, споживаної системою, якому відповідає максимум функцій $F'_m(\alpha)$, $F'_{Im}(\alpha_2^I)$, $F'_{IIm}(\alpha_2^{II})$, або $F'_m \left(G, \frac{\omega}{\omega_0} \right)$, $F'_{Im} \left(G, \frac{\omega}{\omega_0} \right)$, $F'_{IIm} \left(G, \frac{\omega}{\omega_0} \right)$. Для наведеного прикладу на рис.1 зображені розрахункові криві $F'(\alpha)$, $F'_I(\alpha_2^I)$, $F'_II(\alpha_2^{II})$ і реактивної потужності, яку споживає ВД за симетричного і почергових способів керування. З графіків на рис.4 знаходимо потужності статичних конденсаторів $Q_K = 1649$ кВар; $Q'_K = 1320$ кВар; $Q''_K = 1000$ кВар.

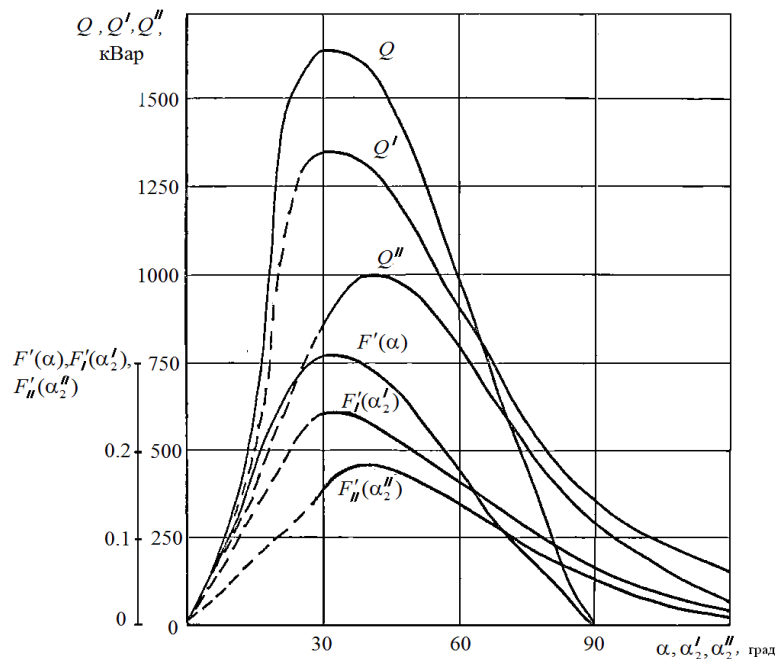


Рисунок 4 - Розрахункові криві $F'(\alpha)$, $F'_I(\alpha_2^I)$, $F'_II(\alpha_2^{II})$ і реактивної потужності ВД при симетричному і почерговому способах керування

Висновки Використання почергових способів керування випрямлячем ВД установок з вентиляторним навантаженням дозволяє знизити величини потужності узгоджувального трансформатора і пристроїв компенсації реактивної потужності. Застосування "другого" почергового способу керування дозволяє досягти найменших значень потужності електрообладнання. "Перший" почерговий спосіб хоч і характеризується вищим значенням встановленої потужності устаткування, проте дозволяє використовувати в одній групі випрямляча некеровані вентиля і спростити систему керування. Показано, що потужність електрообладнання ВД (синхронної машини і залежного інвертора струму з машинною комутацією) значно нижчі для способу керування $\beta_{\min} = f(\gamma)$ ніж для $\beta = \text{const}$. Для наведеного прикладу: за умови $\beta_{\min} = f(\gamma)$ - $P_{\text{вд}} = 4200$ кВт, $P_1 = 4406$ кВт; за умови $\beta = 60^\circ$ - $P_{\text{вд}} = 6000$ кВт, $P_1 = 8716$ кВт.

Список літератури

- 1.Ткачук В.І., Біляковський І.Є, Макарчук О.В., Каша Л.В., Грещук О.В. Теорія та синтез вентильних двигунів постійного струму // Львівська політехніка. – 2011, 288 с.
- 2.Закладний О.М., Закладний О.О. Сучасні методи регулювання якості електроенергії // Промислова електроенергетика та електротехніка (Промелектро). - 2007. - №2. - С. 25-30.
- 3.Модельовння електромеханічних систем: Підручник / Чорний О.П., Луговой А.В., Д.Й.Родькін, Сисюк Г.Ю., Садовой О.В.– Кременчук, 2001. – 410 с.

4.Закладний О.М., Праховник А.В., Соловей О.І. Енергозбереження засобами промислового електропривода: Навчальний посібник. - К: Кондор, 2005. - 408 с.

5.Закладний О.М., Закладний О.О. Вплив способів керування комутатором на гармонічний склад кривих струму і напруги вентильного двигуна // Промислова електроенергетика та електротехніка (Промелектро). - 2008. - №1. - С. 35...40.

6.Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи: Навч. посібник / М. Г. Попович, О. Ю. Лозинський, В. Б. Клепиков та ін.; За ред. М. Г. Поповича, О. Ю. Лозинського. – К.: Либідь, 2005. – 680 с

7. Математичне моделювання електроенергетичних систем в ринкових умовах: монографія / С. Є. Саух, А. В. Борисенко. — К.: «Три К», 2020. — 340 с

O. Zakladnyi¹, Cand.Sc. (Eng.), Assoc. Prof., **ORCID** 0000-0003-2813-3692

V. Prokopenko¹ Cand.Sc. (Eng.), Assoc. Prof., **ORCID** 0000-0002-5518-5802

¹**National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”**

RESEARCH OF VALVE MOTOR CONVERTER CONTROL METHODS

A technique for selecting the electrical equipment of a valve motor with machine commutation has been developed, which takes into account the ways of controlling the inverter. The installed capacity of the electrical equipment of the valve motor (VD) is determined by technological requirements and depends on the structure of the converter, the method of commutation of the converter keys and the methods of controlling the inverter. The use of autonomous inverters with artificial switching, the keys of which are switched due to the reactive energy accumulated in additional switching devices, increases the utilization factor of the synchronous machine. However, in this case, the circuit becomes more complicated and the installed power of the converter increases. The use of IGBT transistors and IGCT thyristors leads to a significant increase in the cost of the equipment.

To reduce the influence of the rectifier VD on the network and match the drive voltage with the supply voltage, a matching transformer and reactive power compensation device may be needed. The amount of power of this equipment is affected by the method of controlling the rectifier, the nature of the engine load and the range of speed changes.

Voltage regulation of the rectifier can be symmetrical or asymmetrical. Several methods of asymmetric regulation are known, among which one of the most expedient is alternating. In the case of alternating control in the three-phase bridge circuit, an artificial zero circuit is created, as a result of which the duration of the current flowing through the secondary windings of the transformer becomes less than 2/3 of the half-cycle of the supply voltage. In addition, the energy indicators also increase, in particular, the reactive power consumption decreases and the shift and power coefficients increase.

Keywords: valve motor, rectifier, inverter, thyristor converter, rectifier control methods.

References

1.Tkachuk V.I., Bilyakovskiy I.E., Makarchuk O.V., Kasha L.V., Greschuk O.V. Theory and synthesis of DC valve motors // Lviv Polytechnic. – 2011, 288 p.

2.Zakladnyi O.M., Zakladnyi O.O. Modern methods of power quality regulation // Industrial electric power and electrical engineering (Promelectro). - 2007. - #2. - P. 25-30.

3.Modeling of electromechanical systems: Textbook / Cherny O.P., Lugovoi A.V., Rodkin D.Y., Sysyuk G.Yu., Sadovoy O.V. – Kremenichuk, 2001. – 410 p.

4.Zakladnyi O.M., Prakhovnyk A.V., Solovei O.I. Energy saving by means of industrial electric drive: Study guide. - K: Condor, 2005. - 408 p.

5.Zakladnyi O.M., Zakladnyi O.O. The influence of commutator control methods on the harmonic composition of valve motor current and voltage curves // Industrial electric power and electrical engineering (Promelectro). - 2008. - No. 1. - P. 35..40.

6.Electromechanical automatic control systems and electric drives: Education. manual / M.G. Popovych, O.Yu. Lozinskyi, V.B. Klepikov, etc.; Under the editorship M. G. Popovych, O. Yu.J. Lozynskyi. - K.: Lybid, 2005. - 680 p.

7.Mathematical modeling of electric power systems in market conditions: monograph / S.E. Saukh, A.V. Borysenko. — K.: "Three K", 2020. - 340 p.

Надійшла: 1.04.2023

Received: 1.04.2023

ЕКОЛОГІЧНІ ПРОБЛЕМИ В ЕНЕРГЕТИЦІ

ENVIRONMENTAL PROBLEMS IN ENERGY

УДК621.039.7

DOI 10.20535/1813-5420.2.2023.279717

І.А. Остапенко¹, асистент, ORCID 0000-0003-3980-1609

Д.О. Лейченко¹, магістр, ORCID 0000-0002-5164-1081

¹Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

СИСТЕМА ФІЗИЧНОГО ЗАХИСТУ ПРИ ПЕРЕВЕЗЕННІ ДЖЕРЕЛ ІОНІЗУЮЧОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ПЕРШОЇ КАТЕГОРІЇ

Відкриття радіоактивності Антуаном Анрі Беккерелем у 1896 році було великим досягненням. Сьогодні радіоактивні речовини використовуються в медицині, сільському господарстві, важкій промисловості, електроенергетиці. Але хоча радіоактивність має широкий спектр корисних застосувань, це відкриття також має протилежний бік – неправильне використання іонізуючого випромінювання, яке може призвести до опіків, променевої хвороби, смерті, раку, пухлин і генетичних мутацій. Джерелом іонізуючого випромінювання (ДІВ) – це фізичний об'єкт, що містить радіоактивний матеріал, або технічну установку, яка генерує або здатна генерувати іонізуюче випромінювання за певних умов. З метою забезпечення дотримання допустимих меж радіаційного опромінення людей, населення та навколишнього природного середовища, як зазначено в кодексах, правилах і стандартах безпеки, існує національний регулюючий орган. В Україні з 2007 року державна реєстрація джерел іонізуючого випромінювання є частиною ліцензійної діяльності у сфері використання ядерної енергії. Ті радіоактивні джерела, які не перебувають або ніколи не перебували під регулятивним контролем, або залишені без нагляду, втрачені, неправильно розміщені, перенаправлені без належного дозволу уряду або викрадені, називаються «покинутими джерелами». Проблема з "покинутих джерелами" полягає в їх потенційній небезпеці для здоров'я населення та труднощах виявлення. Як правило, джерела іонізуючого випромінювання розташовані в металевих контейнерах з товстими стінками, що ускладнює ідентифікацію наявності радіоактивного джерела всередині за допомогою відповідного обладнання. Крім того, вони являють собою об'єкти різних форм і розмірів, і як такі вони часто є об'єктами інтересу для різних груп людей з різними цілями. Потрапляння «покинутого джерела» у руки простих громадян може мати катастрофічні наслідки. Прикладом подібної ситуації є радіоактивне забруднення бразильського міста Гоянія в 1987 році. Після крадіжки зловмисники викинули на смітник компоненти обладнання для променевої терапії, що містять радіоактивний ізотоп цезію-137. Згодом дане джерело виявив місцевий житель, дії якого, необережне поводження призвели до поширення радіоактивного забруднення, внаслідок чого від радіоактивного забруднення загинули чотири людини, а територія, на якій знаходиться це джерело, не придатна для життя наступні 300 років.

Ключові слова: джерело іонізуючого випромінювання, система фізичного захисту, мобільна модульна захисна камера, комплект пакувальний транспортний.

Вступ. Щороку в енергетичних реакторах у світі виробляється понад 10 000 тонн високоактивних ядерних відходів, ядерних матеріалів і радіоактивних матеріалів, і в більшості країн проводяться операції з транспортування цих матеріалів, які пов'язані з використанням надійного обладнання. Перевезення, як правило, здійснюються всередині країни та за кордоном. Здійснення на дорогах, у надзвичайних ситуаціях, може завдати шкоди населенню та навколишньому середовищу; тому, з точки зору локалізації радіоактивних компонентів, питання безпеки транспортування, забезпечення належного захисту людей і населення є актуальним. Як окремий процес транспортування матеріалів – це завантаження залізничним, водним або автомобільним транспортом і розвантаження транспортних контейнерів у місці призначення. Багато людей мають сильне упередження проти носіння такого матеріалу. Іноді це спричинено браком інформації або нерозумінням причини та характеру таких відправлень.

Атомна галузь повинна серйозно поставитися до своїх обов'язків у зв'язках з громадськістю та забезпечити правильний баланс між відкритістю транспорту та вимогами фізичної безпеки відповідно до міжнародних угод. Інформація про безпеку ядерних перевезень повинна бути доступною для широкої аудиторії, оскільки тиск громадської думки на транспортні операції може призвести до тяжких наслідків, затримок і, в деяких випадках, скасування. Складні маршрути та нецільове використання дорожчих транспортних засобів збільшують транспортні витрати та знижують ефективність через додаткові витрати. Ставлення суспільства до проблеми залежить не лише від конкретної інформації, а й

від складних переконань і почуттів, тому навіть маючи незаперечні докази, змінити це ставлення важко.

Мета та задачі. Метою дослідження є дослідження чи дійсно система відповідає тим критеріям які зазначені в законодавстві та розробити заходи модернізації даної системи фізичного захисту.

Для досягнення поставленої мети потрібно виконати наступні **задачі дослідження**:

- зробити огляд літератури та вивчити вимоги до системи фізичного захисту при перевезеннях ДІВ;
- розробити СФЗ для гіпотетичного перевезення ДІВ;

–виконати оцінку ефективності та вразливості створеної СФЗ конкретного гіпотетичного перевезення ДІВ.

Матеріал і результати досліджень. Об'єкт дослідження – захищеність джерел іонізуючого випромінювання першої категорії під час перевезення.

Нині в Україні використовується багато джерел іонізуючого випромінювання (ДІВ) у медичній, науковій та різних галузях промисловості. Використані радіоактивні відходи – це радіоактивні відходи, які переробляються спеціалізованим підприємством Національної компанії «Українське національне об'єднання «Радон» («УкрДО «Радон»)). Нормативні акти дозволяють здійснювати діяльність на території відповідних зон обслуговування. ДМСК здійснює збирання, транспортування та приймання твердих радіоактивних відходів (РАВ), у тому числі РАВ у вигляді відпрацьованих радіоактивних відходів, розміщення РАВ у спеціальних сховищах на промислових майданчиках ДМСК, безпечне зберігання та збереження РАВ має забезпечувати використання використаних РАВ.

Безпека перевезення радіоактивних матеріалів забезпечується комплексом організаційних і технічних заходів. Основним фактором забезпечення безпеки перевезення радіоактивних матеріалів є використання комплектів транспортної тари, які відповідають нормам ядерної та радіаційної безпеки.

Пакувально-транспортний комплект ПКТІВ-120Н призначений для тимчасового зберігання та транспортування використаних високоактивних джерел іонізуючого випромінювання. Комплект являє собою виріб з підвищеною механічною міцністю, термостійкістю та захисними властивостями, що виключає втрату або витік радіоактивного матеріалу та забезпечує ефективний захист від дії іонізуючого випромінювання.

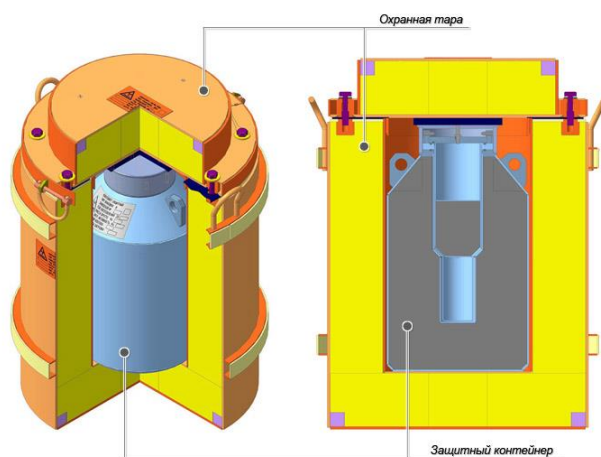


Рисунок 1 – Комплект пакувальний транспортний ПКТІВ-120Н в розрізі

Комплект може бути використаний на підприємствах, де необхідно вилучення з обігу відпрацьовали високоактивні джерела іонізуючого випромінювання (ДІВ) з зазначеними ізотопами і транспортування цих ДІВ до сховища для постійного зберігання.

Комплект зберігає необхідні властивості під впливом наступних кліматичних факторів:

- температура середовища навколо: від 213 до 343 ° K (від -60 до +70 ° C);
- тиск навколишнього середовища до 25 кПа (0,25 кгс /см²);
- відносна вологість повітря – 98% при 308 ° K (35 ° C);
- зовнішній гідравлічний тиск 150 кПа (1,5 кгс /см²) [1].

– **Модульна мобільна захисна камера.** Мобільна модульна захисна камера – це інтегрований технологічний підхід для безпечного поводження з джерелами іонізуючого випромінювання з високою іонізуючою здатністю. ММЗК дозволяє безпечно витягувати ДІВ з біозахисних блоків і направляти їх у спеціальні захисні контейнери з максимальною сумарною активністю $5,2 \cdot 10^{14}$ Бк. Такий перевантаженням досягається компактність розміщення у захисних контейнерах і мала загальна маса ДІВ в захисному контейнері, що дозволяє в подальшому забезпечити безпечне зберігання контейнерів з ДІВ на спеціалізованих сховищах або їх безпечне транспортування в спеціальних транспортних пакувальних комплектах.



Рисунок 2 – Складові елементи захисного контейнера

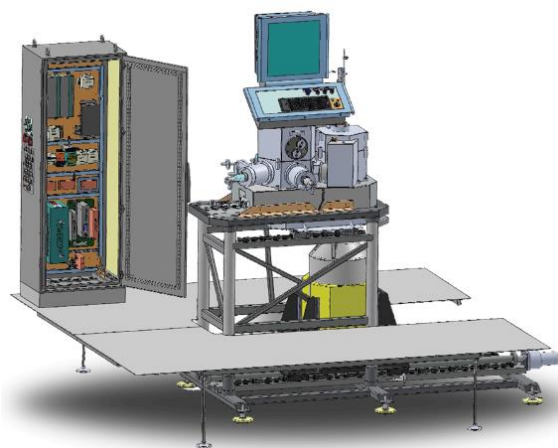


Рисунок 3 – Мобільна модульна захисна камера (Загальний вигляд)

Особливості:

- вилучення ДІВ з блоків здійснюється за допомогою спеціальних маніпуляторів;
- візуалізація процесу випуски та зовнішній огляд видаленого ДІВ здійснюється системою камер високої роздільної здатності (стандартний режим) або ендоскопом, який входить в комплект поставки;
- наявність систем управління процесами, систем захисту та блокування, систем контролю дозування;
- ММЗК являє собою модульну конструкцію, що забезпечує можливість багаторазового монтажу та демонтажу, пакування в спеціальну транспортну тару та транспортування будь-якими видами транспорту;
- ММЗК призначений для захисту персоналу від іонізуючого випромінювання від джерела ^{137}Cs з активністю до 10 Кі або джерела ^{60}Co з активністю до 0,037 Кі, розташованого всередині ММЗК, або від захисного контейнера для джерела ^{137}Cs з щільність 14 000 Кі або джерело ^{60}Co з максимальною активністю 1,8 Кі;
- до складу ММЗК входить штатний підйомний механізм, що дозволяє з точно встановлювати блок джерела на стіл для розрядки джерела;
- штатний підйомний механізм може бути використаний в процесі зборки / розбирання ММЗК.

Мобільне приміщення. Мобільне приміщення (МП) призначено для установки в ньому Мобільної модульної захисної камери (ММЗК) на різних майданчиках ГК “УкрДО” Радон “і виконання в ній операцій з вилучення та підготовки до транспортування високоактивних джерел іонізуючого випромінювання.

Можливості:

- розміщення в ньому ММЗК;
- забезпечити нормальні умови праці з ММЗК;
- транспортування мобільної камери в складі МП;
- підготовка до демонтажу та виведення з експлуатації блок- джерел;
- встановити контейнер захисту (ПКТИВ-120Н) і блок джерела в ММЗК;
- проведення робіт з безпечної розрядки ДІВ [3].

Конструктивно Мобільне приміщення є модулем для установки в ньому ММЗК і додаткового обладнання:

- механізм вантажопідйомний;
- кондиціонування повітря з фільтрами;
- вентиляція;
- система пожежної сигналізації;
- система обігріву модуля;
- система освітлення;
- система підключення і розподілу електроживлення.

Конструкція Мобільного приміщення забезпечує:

- зручність і надійність в експлуатації;
- вологостійкість, стійкість до атмосферних опадів, дезактивуючі та миючі речовин;
- збереження вантажу при транспортуванні, зберіганні і перевантаженні контейнера;
- зручність технічного огляду та виконання ремонту ;
- транспортування автомобілем без спеціального дозволу (завдяки компактним розмірам МП);
- захист від корозії елементів конструкції контейнера, які можуть бути схильних до її впливу [3].



Рисунок 4 – Мобільне приміщення у транспортному положенні

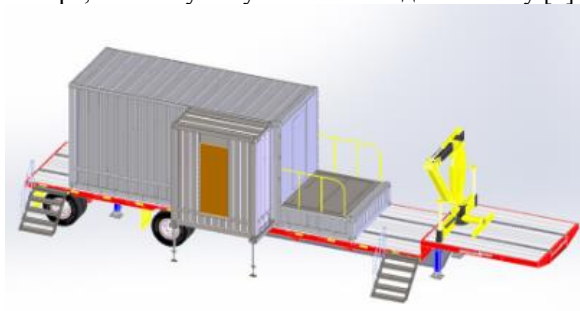


Рисунок 5 – Мобільне приміщення у робочому положенні

Центр управління перевезеннями радіоактивних матеріалів.

Пропоную створити на території України Центр управління автомобільним транспортом радіоактивних матеріалів (ЦУП РМ). Кінцевим споживачем ЦУП в Республіці Молдова є державна компанія «Українське національне об'єднання «Радон» (ГК «УкрДО «Радон»), у тому числі 6 національних міжрегіональних спеціалізованих зернозбиральних комбайнів (ДММК), які здійснюють практичну діяльність у транспорті радіоактивних на території України речовин [4].

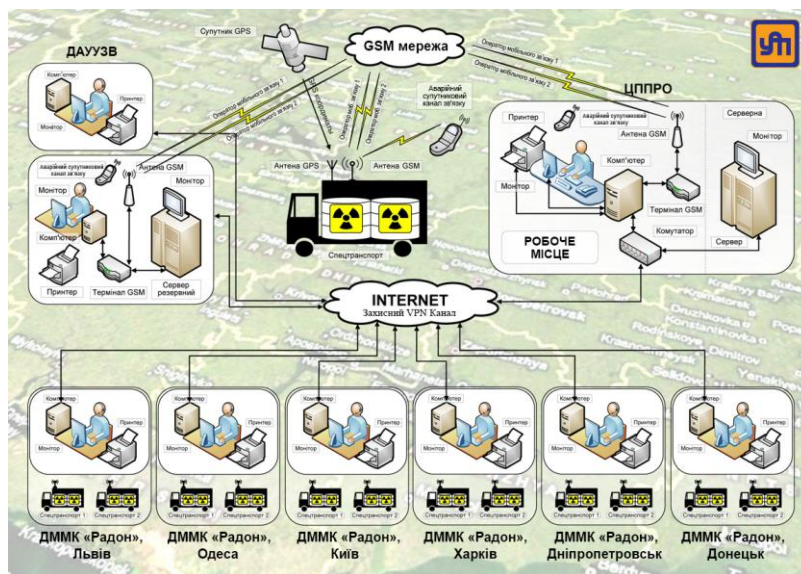


Рисунок 6 – Схема Центру управління перевезеннями радіоактивних матеріалів

Метою створення центру управління автомобільними перевезеннями радіоактивних матеріалів в Україні є створення та підтримання належного рівня безпеки при здійсненні такої практичної діяльності у сфері використання ядерної енергії.

Спецтранспорт складається з:

- «Тривожна» кнопка;
- антена GSM/GPS
- датчик диму;
- блок детектування МЕД;
- блок відкриття контейнера (двері) ;
- блок ідентифікації водія;
- терминал GSM/GPS;
- система контролю втомленості водія;
- HUB Ajax для фіксації руху в контейнері.

–**Система "Menatir"**. Дана система буде використовуватися для спостереження за мобільною камерою та спеціальним транспортом який транспортує ДІВ першої категорії. На відміну від більшості

безпілотників, дрон «Менатир» є повністю автономним, оскільки він може злітати та приземлятися вертикально в заданій точці. Система, яка допоможе отримати точні дані якомога швидше. Наші системи дозволяють знімати фотографії та відео на великих площах майже цілодобово, вдень і вночі. Завдяки точній навігації RTK і камерам високої роздільної здатності дрони мережі можна використовувати для фотозйомки; відеозйомки; тепловізійної зйомки; геодезії; картографування великих територій;



Рисунок 6 – Спецтранспорт

Групу з 6 дронів розміщують на платформі в контейнері, де вони зберігаються та автоматично перезаряджаються. За сигналом про початок польоту літак підняли на платформу, перемістили маніпулятором на злітно-посадкову смугу та злетіли вертикально. Після виконання завдання дрон повертається в контейнер, вертикально паркується на платформі, переміщує руку робота на платформу і опускається в контейнер [5].

Кожен контейнер системи MENATIR може бути оснащений безпілотниками з різними типами модулів корисного навантаження для виконання широкого спектру завдань. У контейнері також може перебувати кілька літальних апаратів, які перевозять один і той же тип вантажного модуля, і вони можуть виконувати завдання одного типу в різних точках одночасно. Кількість і тип модулів корисного навантаження в системі оптимізовано відповідно до потреб замовника. Від отримання завдання до зльоту дрона пройшло 3 хвилини. Через перекриття районів середній час польоту до місця місії становить 10 хвилин.



Рисунок 7 – Загальний вид системи

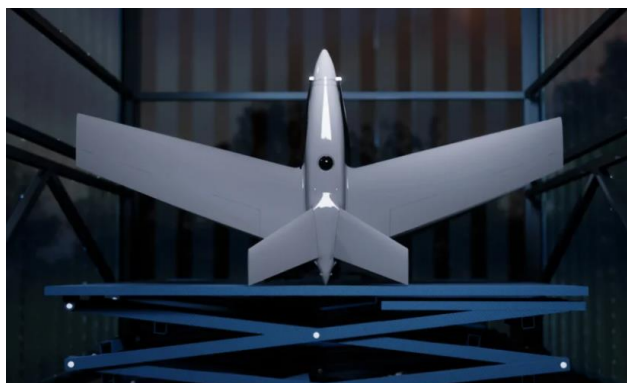


Рисунок 8 – Вид зсередини системи

Висновки. Проаналізувавши законодавчу базу України, можна зробити висновок, що існуюча система фізичного захисту (а особливо її комплекс інженерно-технічних засобів), повністю задовольняє усім вимогам до даної системи. Проте система фізичного захисту в тому вигляді, якою вона є сьогодні, не

дозволяє забезпечити протидію та контроль проникнення від зовнішніх та внутрішніх правопорушників. А в реаліях поточної нестабільності у політиці та напруженій фінансовій ситуації в світі, постає великий ризик здійснення злочину правопорушником.

Тому в наступних розділах була проведена розробка консервативної системи фізичного захисту при перевезенні джерела іонізуючого випромінювання першої категорії. Було проаналізовано рекомендації як світові, так і українські, проаналізовано законодавство та створена власна консервативна система з максимальним використанням українських компонентів та систем. Для транспортування був вибраний транспортувальний комплект з додатковим фізичним захистом, щоб зменшити до мінімуму можливість викрадення ДІВ. Була замінена платформа для транспортування ДІВ на українську, щоб унеможливити шпіонаж за переміщенням джерел. Мобільна камера та транспорт для транспортування були додаткові оснащенні системами фізичного захисту українського виробництва, для контролю за персоналом та за обстановкою навколо камери. Для охорони конвою була додана група швидкого реагування.

Вся система розроблялася без економічних аспектів з вимогою забезпечити безпеку гіпотетичного об'єкту.

Список використаної літератури

1. Комплект пакувальний транспортний ПКТІВ-120Н для тимчасового зберігання та транспортування відпрацьованих джерел іонізуючого випромінювання. URL: <https://uap.kiev.ua/archives/projects/комплект-пакувальний-транспортний>
2. Модульна мобільна камера. URL: <https://uap.kiev.ua/archives/projects/модульна-мобільний-захисна-камера-мм>.
3. <https://menatir.com/uk/networkIAEA-TECDOC-749> : Generic initiating events for PSA for WWER reactors.
4. IAEA RER/9/005 2/93 : Working material – Defining Initiating events for PSA's for WWER reactors.
5. ДНАОП-97. НРБУ-97/Д 2000 (ДНАОП 0.03-3.24-97 (ДГН 6.6.1-6.5.061-98)): Норми радіаційної безпеки України (НРБУ-97) / Міністерство охорони здоров'я України, 2000.
6. НП 306.2.141-2008 : Загальні положення безпеки атомних станцій, затверджені наказом Держатомрегулювання від 19.11.2007 №162 (зарєєстровані Мін'юстом 25.01.2008 за №56/14747) / Міністерство юстиції України, 2008.
7. НП 306.1.02/1.034-2000 : Загальні положення забезпечення безпеки атомних станцій / Міністерство юстиції України, 2008.
8. ДНАОП 0.04-1.06-90. (ПБЯ РУ АС-89) ПНАЭГ-1-024-90: Правила ядерної безпеки реакторних установок атомних станцій.
9. Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку : Закон України від 23.05.2017.
10. НПАОП 40.1-1.21-98 : Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів / Міністерство юстиції України, 1998.
11. ДБН В.1.1.7-2002 : Захист від пожежі. Пожежна безпека об'єктів будівництва / Держбуд України, Київ, 2003.
12. НАПБ В.01.34-2005/111 : Правила пожежної безпеки в компаніях, на підприємствах та в організаціях енергетичної галузі України / Державний науково-дослідний проектно-вишукувальний технологічний інститут з перспектив розвитку енергетики «Енергоперспектива», 2005.
13. НАПБ В.01.046-2004/111 : Правила пожежної безпеки при експлуатації атомних станцій / Міністерство юстиції України, 2007.
14. ДСТУ 3675-98 : Пожежна техніка. Вогнегасники переносні. Загальні технічні вимоги та методи випробувань / Український науково-дослідницький інститут пожежної безпеки МНС України, 1999.
15. ДБН В.2.5-56-2014 : Системи протипожежної безпеки / Міністерство юстиції України, 2014.

I. Ostapenko¹, assistant, ORCID 0000-0003-3980-1609

D. Leichenko¹, master, ORCID 0000-0002-5164-1081

¹**National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”**

SYSTEM OF PHYSICAL PROTECTION DURING TRANSPORTATION OF SOURCES OF IONIZING RADIATION OF THE FIRST CATEGORY

The discovery of radioactivity by Antoine Henri Becquerel in 1896 was a major achievement. Today, radioactive substances are used in medicine, agriculture, heavy industry, and power generation. But while radioactivity has a wide range of useful applications, this discovery also has a flip side - the misuse of ionizing radiation that can lead to burns, radiation sickness, death, cancer, tumors and genetic mutations. A source of ionizing radiation (IRS) is a physical object containing radioactive material or a technical installation that generates or is capable of generating ionizing radiation under certain conditions. In order to ensure compliance with the permissible limits of radiation exposure of people, the population and the natural environment, as specified in codes, rules and safety standards, there is a national regulatory body. In Ukraine, since 2007, state registration of sources of ionizing radiation has been a part of licensing activities in the field of nuclear energy use. Those radioactive sources that are not or have never been under regulatory control, or are left unattended, lost, misplaced, diverted without proper government authorization, or stolen, are called "abandoned sources." The problem with

"abandoned sources" is their potential danger to public health and the difficulty of detection. As a rule, sources of ionizing radiation are located in metal containers with thick walls, which makes it difficult to identify the presence of a radioactive source inside with the help of appropriate equipment. Furthermore, they are objects of different shapes and sizes, and as such they are often objects of interest to different groups of people with different purposes. Getting an "abandoned source" into the hands of ordinary citizens can have catastrophic consequences. An example of a similar situation is the radioactive contamination of the Brazilian city of Goiânia in 1987. After the theft, the perpetrators dumped radiation therapy equipment components containing the radioactive isotope cesium-137 into the trash. Later, this source was discovered by a local resident, whose actions and careless handling led to the spread of radioactive contamination, as a result of which four people died from radioactive contamination, and the area where this source is located is not suitable for life. the next 300 years.

Keywords: *source of ionizing radiation, physical protection system, mobile modular security camera, packaging transport kit.*

References

1. Transport packing set PKTIV-120N for temporary storage and transportation of spent sources of ionizing radiation. URL: <https://uap.kiev.ua/archives/projects/komplekt-pakuvalnyi-transportnyi->
2. Modular mobile camera. URL: <https://uap.kiev.ua/archives/projects/modulna-mobilnyi-sakshina-kamera-mm>.
3. <https://menatir.com/uk/networkIAEA-TECDOC-749> : Generic initiating events for PSA for WWER reactors.
4. IAEA RER/9/005 2/93 : Working material – Defining Initiating events for PSA's for WWER reactors.
5. DNAOP-97. NRBU-97/D 2000 (DNAOP 0.03-3.24-97 (DGN 6.6.1-6.5.061-98)): Radiation Safety Standards of Ukraine (NRBU-97) / Ministry of Health of Ukraine, 2000.
6. NP 306.2.141-2008: General regulations for the safety of nuclear power plants, approved by the order of the State Nuclear Regulatory Commission No. 162 dated 19.11.2007 (registered by the Ministry of Justice on 25.01.2008 under No. 56/14747) / Ministry of Justice of Ukraine, 2008.
7. NP 306.1.02/1.034-2000: General provisions for ensuring the safety of nuclear power plants / Ministry of Justice of Ukraine, 2008.
8. DNAOP 0.04-1.06-90. (PBYA RU AS-89) PNAEG-1-024-90: Rules of nuclear safety of reactor installations of nuclear power plants.
9. On the use of nuclear energy and radiation safety: Law of Ukraine dated May 23, 2017.
10. NPAOP 40.1-1.21-98: Rules for safe operation of consumer electrical installations / Ministry of Justice of Ukraine, 1998.
11. DBN V.1.1.7-2002: Fire protection. Fire safety of construction objects / State Building of Ukraine, Kyiv, 2003.
12. NAPB B.01.34-2005/111: Rules of fire safety in companies, enterprises and organizations of the energy industry of Ukraine / State Scientific Research Design Research Technological Institute for Energy Development Prospects "Energoperspectiva", 2005.
13. NAPB V.01.046-2004/111: Rules of fire safety during operation of nuclear power plants / Ministry of Justice of Ukraine, 2007.
14. DSTU 3675-98: Fire engineering. Fire extinguishers are portable. General technical requirements and test methods / Ukrainian Scientific and Research Institute of Fire Safety of the Ministry of Emergency Situations of Ukraine, 1999.
15. DBN V.2.5-56-2014: Fire safety systems / Ministry of Justice of Ukraine, 2014.

Надійшла: 18.01.2023

Received: 18.01.2023

ВИДАЛЕННЯ СПОЛУК ЗАЛІЗА ІЗ МЕХАНІЧНИХ ФІЛЬТРІВ ПОБУТОВИХ ЗВОРотноОСМОТИЧНИХ СИСТЕМ ОЧИЩЕННЯ ВОДИ

Анотація. *Сьогодні найбільш зручним та поширеним варіантом очищення та доочищення питних вод є встановлення систем зворотного осмосу безпосередньо в точках водовідбору. При експлуатації систем зворотного осмосу більшість власників не переймаються негативними наслідками використання таких систем. Адже після 3-6 місяців використання механічних фільтрів першого ступеню обробки води такі фільтри викидаються разом з іншим побутовим сміттям. Вони становлять значну загрозу для довкілля. На сьогодні в Україні не існує компаній чи організацій, які б займалися збором та утилізацією таких фільтрів. Цей напрямок є неосвоєним. Практично відсутні відповідні дані і в науковій літературі. Якщо зважити на те, що лише в м. Києві за нашими підрахунками сьогодні експлуатується біля 88 тис. побутових систем зворотного осмосу, то легко порахувати, що протягом року в довкілля потрапляє 176 тис. картриджів загальним об'ємом поліпропілену 105 м³. Загальну шкоду для довкілля від картриджів навіть одного міста важко уявити. Тому питання регенерації механічних фільтрів систем зворотного осмосу є достатньо актуальним і важливим на сьогодні. Метою даної роботи є розробка екологічно безпечної технології регенерації механічних фільтрів з можливістю їх багаторазового використання. У цій статті висвітлюються результати досліджень з регенерації механічних фільтрів, наводиться характеристика процесу очищення шляхом використання сірчаної кислоти, показуються варіанти екологічно безпечної переробки відходів з такої регенерації.*

Ключові слова: *зворотній осмос, картридж, механічний фільтр, регенераційний розчин, нейтралізація, фільтрування, сульфатна кислота.*

Вступ. Інтенсивне забруднення поверхневих та підземних вод в результаті антропогенної діяльності людини з кожним роком скорочує кількість придатної для споживання води. Сьогодні практично всі водойми на території України характеризуються як забруднені та брудні (III-й та IV-й клас якості) [1]. В окремих регіонах України, включаючи басейни Дніпра, Сіверського Дінця, річок Приазов'я вода класифікується як «дуже брудна» (V-й клас якості). Тому перед споживанням таких вод необхідно обов'язково проводити їх очищення та знезараження. Але навіть в цьому випадку не можна гарантувати необхідну якість питної води в місцях водовідбору, оскільки в процесі попередньої обробки води спостерігається її вторинне забруднення хімічними реагентами та хлором, а тривале перебування в старих, досить зношених трубопроводах супроводжується переходом у воду сполук заліза та різноманітних біологічних об'єктів [2]. Тому в більшості країн світу найбільш прийнятним варіантом приведення якості питної води до вимог чинних нормативних документів вважається доочищення її безпосередньо в точках водовідбору – квартирах, будинках, офісах [3]. Досвід останніх років показує, що найбільш зручним та поширеним варіантом очищення та доочищення питних вод є встановлення систем зворотного осмосу.

При експлуатації систем зворотного осмосу більшість власників не переймаються негативними наслідками використання таких систем. Практично відсутні відповідні дані і в науковій літературі. Тому, зважаючи на широке розповсюдження таких систем, дослідження в цьому напрямку є досить актуальними та своєчасними. Причому, важко без відповідних досліджень навіть уявити, які системи наносять довкіллю більше шкоди – промислові чи побутово-офісні. На відміну від останніх, промислові системи ще не набули такого масового використання і при їх експлуатації є можливість впроваджувати технології регенерації елементів системи та промивки мембран і фільтрів, знешкоджувати концентрати і т.п., оскільки все це локалізується на невеликій території. У випадку ж побутово-офісних систем такої можливості не існує, а будь-які ефективні дії в цьому напрямку потребують від користувачів широкого спектру спеціальних знань та умінь. Тому всі відходи експлуатації таких систем просто скидаються в довкілля.

Типова сучасна система зворотного осмосу може нараховувати сьогодні до 9 ступенів обробки води [3]. При цьому кожна ступінь призначена для видалення тих чи інших забруднень або обробки води з метою покращення її якості.

Ефективність процесу зворотного осмосу щодо різних домішок та розчинених речовин залежить від ряду факторів. Тиск, температура, рівень рН, матеріал мембрани та хімічний склад вхідної води впливають на ефективність роботи систем зворотного осмосу.

На першій ступені обробки із потоку видаляють тверді частки розміром до 1 – 20 мкм в залежності від початкового складу води. Для цього використовують, переважно, картриджі із поліпропілену з відповідним розміром пор. В процесі експлуатації в порах та на поверхні картриджа осаджуються частинки піску, глини, іржі, гідроксидів металів, органічних об'єктів і т.п. З часом гідравлічний опір картриджа в результаті заповнення пор та формування на поверхні шару домішок стає досить значним, що потребує збільшення витрат енергії для систем із додатковим насосом чи супроводжується зниженням продуктивності обладнання доочищення для систем, підключених безпосередньо до мережі централізованого водопостачання. Як показали наші дослідження (рис. 1), навіть при незначних напорах, різниця між «чистим» картриджем та картриджем з вичерпаним ресурсом використання досить суттєва. Характеристики картриджа за 6 місяців погіршуються більше ніж у 2 рази. Картридж, котрий відпрацював свій ресурс, потребує заміни. Його демонтують і замінюють новим. Використаний картридж разом із затриманими ним забрудненнями поповнює об'єм твердих побутових відходів.

Мета та завдання. Метою даної роботи є розробка екологічно безпечної технології регенерації механічних фільтрів з можливістю їх багаторазового використання. Головним завданням дослідження є пошук ефективних та екологічно безпечних способів очищення механічних фільтрів систем зворотного осмосу.

Методика роботи полягала в осадженні розчинів $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ різної концентрації розчинами NaOH та $\text{Ca}(\text{OH})_2$, дослідженні інтенсивності розчинення отриманих осадів розчинами сірчаної кислоти різної концентрації, визначенні інтенсивності освітлення та фільтрування отриманих суспензій.

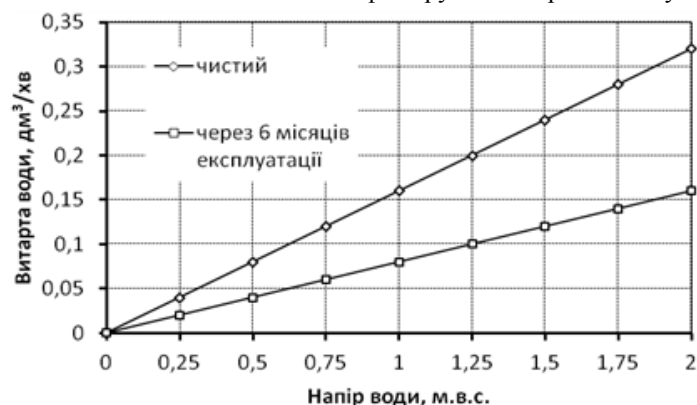


Рисунок 1 – Зміна пропускної здатності поліпропіленового картриджа в процесі експлуатації

Механічний фільтр типової побутової десятидюймової системи зворотного осмосу представляє собою картридж у вигляді порожнистого циліндру із пористого поліпропілену зовнішнім діаметром 6,35 см, внутрішнім діаметром 3 см та довжиною 25,4 см (рис. 2). Картридж може бути сформований із спіненого поліпропіленової маси або намотаний поліпропіленовим волокном. Картриджі виготовляються з розміром пор (мікронаж) 1, 5, 10 та 20 мкм. Вартість картриджів у відповідних компаніях на території України починається, приблизно, з 20 грн. і збільшується до 100 і більше гривень в залежності від наявності антибактеріального покриття, обробки поверхні спеціальними реагентами і т.п. [4 - 6]. Більш важливим параметром є періодичність заміни картриджа. На жаль, сьогодні єдиного підходу в цій справі немає. Ряд компаній пропонують замінювати картридж не рідше 1 разу в 6 місяців [7 - 9], інші – зазначають в характеристиках його ресурс, наприклад, 10 000 дм³ води [10 - 12]. Але проблема в тому, що переважна більшість побутових систем не обладнані лічильниками обробленої води, тому зафіксувати момент вичерпання ресурсу практично неможливо. Заміна картриджа кожні 6 місяців також є досить суб'єктивною процедурою, оскільки не враховує якість води, інтенсивність її споживання, умови експлуатації системи і т.п.

Виходячи з викладеного, в результаті експлуатації побутової системи зворотного осмосу протягом року замінюється 2 поліпропіленові картриджі. Ряд компаній при заміні картриджів забирають використані для знешкодження [13 - 14], однак нам не вдалося ознайомитися із реальною технологією цієї процедури. І якщо з точки зору економіки можливо цей факт виправдати, оскільки вартість картриджів досить низька, то екологічні аспекти з кожним роком будуть загострюватися. Легко порахувати, що кожен картридж вміщує біля 625 см³ спіненого поліпропілену або поліпропіленової нитки. В процесі експлуатації картридж не зазнає якихось змін, що перешкоджають його повторному використанню. Оскільки картридж виготовлено із пористого поліпропілену, то можна стверджувати, що саме такі вироби в довіллі стають джерелами часток мікропластику. В потоці побутових відходів, куди переважно потрапляють картриджі сьогодні, в результаті багаторазових перевантажень та транспортувань саме з такими пористими елементами відбувається руйнування в найбільшій мірі. Та й 625 см³ поліпропілену гарантовано зберезуть

якийсь об'єм вуглеводнів. Все викладене свідчить на користь регенерації поліпропіленових картриджів та повторного їх використання. Якщо зважити, що лише в м. Києві за нашими підрахунками сьогодні експлуатується біля 88 тис. побутових систем зворотного осмосу, то легко порахувати, що протягом року в довкілля потрапляє 176 тис. картриджів загальним об'ємом поліпропілену 105 м³. Загальну шкоду для довкілля від картриджів навіть одного міста важко уявити. З іншого боку, більшість власників систем зворотного осмосу для заміни картриджів користуються послугами спеціалізованих компаній, тому збір картриджів із вичерпаним ресурсом та їх локалізація в одному місці взагалі не є проблемою.



Рисунок 2 – Зовнішній вигляд та розміри типового 10 " поліпропіленового картриджа:
а – пресований; б – з поліпропіленової нитки; в – після 6 місяців експлуатації; г – основні розміри

Оскільки екологічний аспект – основна мета нашого дослідження, то очевидно, що і технологія регенерації поліпропіленових картриджів повинна бути екологічно безпечною. З цієї точки зору і розроблялася дана технологія.

Проведені нами дослідження показали, що основну масу твердих часток, затриманих картриджем, представляють оксиди та гідроксиди заліза (III) (рис. 3). Дослідження проведені для картриджів, що використовували для очищення води з підземного горизонту.



Рисунок 3 – Склад осадів на поліпропіленових фільтрах

При доочищенні води централізованого водопостачання склад осадів буде, очевидно, іншим. Для очищення картриджа від таких забруднень найбільш прийнятним видається використання кислот відповідної концентрації, оскільки ефективно видаляти тверді частки з пор картриджа без їх розчинення практично неможливо. Вивчення особливостей використання таких картриджів показало, що при тривалій їх експлуатації чи при значній концентрації сполук заліза, на поверхні картриджа формується намівний шар із забруднень, котрий руйнується при видаленні картриджа з водного середовища. Таким чином, перший етап регенерації картриджа відбувається вже на етапі його демонтажу. Наступний етап доцільно проводити розчинами сірчаної кислоти. При цьому оксиди та гідроксиди заліза (III) переходять в розчин та звільняють пори картриджа: $2\text{Fe}(\text{OH})_3 + 3\text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 + 3\text{H}_2\text{O}$.

Оскільки значний надлишок кислоти потребує значної витрати реагентів при наступній нейтралізації, нами було досліджено швидкість розчинення гідроксиду заліза (III) в розчинах сірчаної кислоти (рис. 4). Встановлено, що при терміні контакту з розчином кислоти протягом 30 хв. досягається різна ступінь розчинення попередньо осадженого гідроксиду заліза (III). Як видно з рис. 4, при підтриманні рН на рівні 1,5 весь осад протягом зазначеного часу переходить в розчин кислоти. При цьому доцільно кислоту додавати по мірі росту рН. Як показує досвід роботи з використаними картриджами механічного очищення, всі вони мають різний рівень забруднення, тому важко визначити завчасно концентрацію та необхідний об'єм кислоти для їх регенерації. При рН регенеруючого розчину на рівні 2,0 термін розчинення гідроксидів заліза (III) зростає в 1,5 – 2,0 рази, однак це вимагає меншої витрати реагентів для

його наступної нейтралізації. Зважаючи на те, що ресстрація рН розчинів сьогодні не викликає технічних труднощів, підтримання необхідного рН варто доручити автоматизованій системі його вимірювання та дозування розчину кислоти.

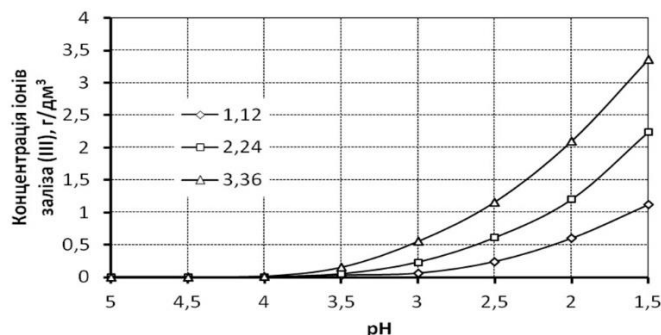
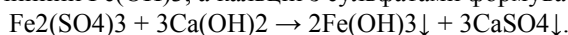


Рисунок 4 – Залежність концентрації іонів заліза (III) в розчині сірчаної кислоти від величини водневого показника при різних початкових концентраціях іонів заліза (г/дм³)

Відпрацьований розчин заліза найдоцільніше обробляти вапном. При цьому іони заліза (III) гідролізуюватимуться в малорозчинний $\text{Fe}(\text{OH})_3$, а кальцій з сульфатами формуватимуть частки гіпсу:



Відфільтрований маточний розчин із вмістом сульфату кальцію на рівні розчинності (2,0 г/дм³ [15]) використовується для приготування наступної дози регенераційного розчину шляхом дозування відповідної кількості сірчаної кислоти. Відфільтрована тверда фаза із суміші гідроксиду заліза та гіпсу при накопиченні достатньої кількості може бути використана в технологіях отримання будівельних матеріалів та конструкцій. Для встановлення мінімальної залишкової концентрації заліза в маточному розчині було проведено цикл дослідів і встановлено (рис. 5), що оптимальним можна вважати рН 4,0 – 4,5, при яких вміст іонів заліза знаходиться на рівні їх вмісту в питній воді.

Важливою є проблема розділення твердої та рідкої фаз. Зважаючи на об'єми суспензії, найбільш прийнятним можна вважати фільтрування. Відстоювання в даному випадку не дозволяє отримати завершений процес, та й відстоюється суспензія аж надто повільно. Наприклад, при концентрації іонів заліза в початковому розчині 5,6 г/дм³ та доведених рН розчином гідроксиду натрію до 4,03 за 3 год освітлюється лише 5 см³ суспензії. Більш прийнятним виявилось фільтрування. В цьому випадку визначальним виявився водневий показник суспензії (рис. 6). При рН 2,6 маточний розчин фільтрується дуже швидко завдяки відсутності твердої фази, котра починає формуватися лише після рН > 3. Однак, при таких рН утворюється желеподібний осад, що фактично перекриває пори фільтру і гальмує процес фільтрування. Найкращі результати отримані при рН = 4,5, коли частки гідроксиду повністю сформовані і добре віддають вологу. Так, якщо при рН = 4,03 за дві години відфільтровується рідкої фази в кількості лише 28 % від початкового об'єму суспензії, то при рН = 4,5 вже 89 %, причому, протягом 50 хв.

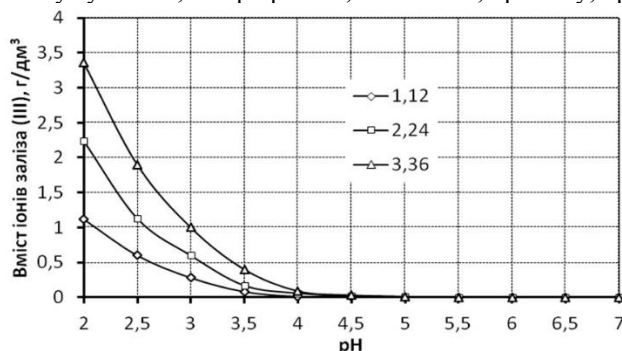


Рисунок 5. – Залежність залишкових концентрацій іонів заліза (III) в освітленому розчині від величини водневого показника при різних початкових концентраціях іонів заліза (г/дм³)

Таким чином, проведений аналіз дозволяє стверджувати, що експлуатація побутово-офісних систем зворотного осмосу супроводжується значним негативним впливом на довкілля. Утворенням значної кількості специфічних твердих відходів сприяє збільшенню в довкіллі частинок мікропластику. Основними компонентами осадів на механічних фільтрах є сполуки заліза (III). Запропонована екологічно безпечна технологія регенерації поліпропіленових фільтрів етапу механічної очистки води систем зворотного осмосу. Технологія передбачає обробку використаних картриджів розчином сірчаної кислоти при рН 1,5 – 2,0 з наступною нейтралізацією отриманого розчину гідроксидом кальцію до рН 4,0 – 4,5 для формування в маточному розчині суміші гідроксиду заліза (III) та гіпсу. Тверда фаза відділяється від маточного розчину фільтруванням та використовується в промисловості будівельних матеріалів, а

фільтрат коригується кислотою та повторно використовується в технологічному процесі.

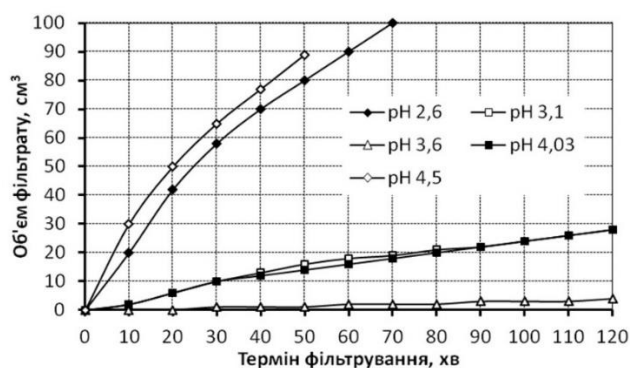


Рисунок 6. – Швидкість фільтрування суспензій гідроксиду заліза (III), отриманих при різних значеннях pH ($C_3 = 5,6$ г/дм³)

Висновки: Баромембранні системи очищення води залишаються на сьогодні найпопулярнішим і найбезпечнішим методом очищення води до вимог питної. Проте наявність відходів, які утворюються в результаті експлуатації таких систем, становлять значну шкоду довкіллю. Використані механічні фільтри першого ступеню очистки можуть підлягати регенерації і повторно використовуватися в установках зворотного осмосу. Вивчення особливостей використання таких картриджів показало, що при тривалій їх експлуатації чи при значній концентрації сполук заліза, на поверхні картриджа формується наливний шар із забруднень, котрий руйнується при видаленні картриджа з водного середовища. Таким чином, перший етап регенерації картриджа відбувається вже на етапі його демонтажу. Наступний етап доцільно проводити розчинами сірчаної кислоти. При цьому оксиди та гідроксиди заліза (III) переходять в розчин та звільняють пори картриджа.

Технологія регенерації передбачає використання розчину сульфатної кислоти. При підтриманні pH на рівні 1,5 весь осад із забруднених пор фільтра впродовж півгодини переходить в розчин кислоти. При цьому доцільно кислоту додавати по мірі росту pH. Відпрацьований розчин заліза найдоцільніше обробляти вапном із подальшим фільтруванням. Відфільтрований маточний розчин із вмістом сульфату кальцію на рівні розчинності (2,0 г/дм³ [15]) використовується для приготування наступної дози регенераційного розчину шляхом дозування відповідної кількості сірчаної кислоти. Відфільтрована тверда фаза із суміші гідроксиду заліза та гіпсу при накопиченні достатньої кількості може бути використана в технологіях отримання будівельних матеріалів та конструкцій.

Список використаної літератури

1. Забруднення річок України: причини та наслідки, 2019. [Електронний ресурс] – URL: <https://ns-plus.com.ua/2019/07/10>.
2. Гіроль М. М., Гіроль А. М., Хомко В. Є., Ковальський Д. М., 2016. [Електронний ресурс] – URL: <http://polypipe.info>.
3. Радовенчик Я. В., Гомеля М. Д. Фізико-хімічні методи доочищення води: підручник. Київ : Кондор-Видавництво, 2016. 264 с.
4. Картридж поліпропіленовий ПП 10" 1 мкм. [Електронний ресурс] – URL: <https://www.aqua-ua.com/ua/product/kartridzh-polipropilenovyy-pp-10-1-mkm/>
5. Покращений комплект картриджів Ecosoft 1-2-3 для фільтрів зворотного осмосу (CHV3ECO). [Електронний ресурс] – URL: <https://ecosoft.ua/ua/uluchshennyu-komplekt-kartridzhey-ecosoft-1-2-3-dlya-filtra-obratnogo-osmosa/>
6. Комплект картриджів 1-2-3 Ecosoft для фільтрів зворотного осмосу. [Електронний ресурс] – URL: <https://bt.rozetka.com.ua/dlya-sistem-obratnogo-osmosa/c196454/>
7. Комплект картриджів Ecosoft CPV3ECOSTD. Характеристика. [Електронний ресурс] – URL: https://bt.rozetka.com.ua/ecosoft_dlya_filjtrov-obratnogo-osmosa-cpv3ecostd/p24577196/
8. Картридж зі спіненого поліпропілену Ecosoft 2,5"x10" 10 мкм. [Електронний ресурс] – URL: <https://filterhome.com.ua/ua/p1081498458-kartridzh-spinenogo-polipropilenu.html>
9. Покращений набір картриджів для зворотного осмосу Aqualite Premium. [Електронний ресурс] – URL: <https://vodavdom.ua/ua/Product/2264>
10. Картридж зі спіненого поліпропілену Ecosoft 4,5"x20" 20 мкм (CPV452020ECO). [Електронний ресурс] – URL: <https://ecosoft.ua/ua/kartridzh-iz-vspennogo-polipropilena-ecosoft-4-5-x20-20-mkm/>
12. FilmTec Reverse Osmosis/Nanofiltration Membranes. [Електронний ресурс] – URL: <https://www.dupont.com/content/dam/dupont/amer/us/en/water-solutions/public/documents/en/RO-NF-FilmTec-Manual-45-D01504-en.pdf>
13. Замовлення монтажу або обслуговування фільтра. [Електронний ресурс] – URL:

<https://ecosoft.ua/ua/services/>

14. Сервісне обслуговування зворотного осмосу. [Електронний ресурс] – URL: <https://vencon.ua/ua/catalog/servis-obratnogo-osmosa>

15. Гороновский И. Т., Назаренко Ю. П., Некряч Е. Ф. Краткий справочник по химии. Киев : Из-во АН УССР, 1962. 660 с.

Y. Radovenchyk¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID ORCID 0000-0002-0101-0273

O. Ivanenko¹, Dr. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0001-6838-5400

M. Karpenko¹, Ph.D. student, ORCID 0000-0003-3237-4130

**¹National Technical University of Ukraine Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute
REMOVAL OF IRON COMPOUNDS FROM MECHANICAL FILTERS
HOUSEHOLD REVERSE OSMOTIC SYSTEMS WATER PURIFICATION**

Today, the most convenient and widespread option for cleaning and purifying drinking water is to install reverse osmosis systems directly at the water intake points. However, the use of reverse osmosis systems has disadvantages associated with the frequent need to replace their elements. The article discusses the competitiveness of negative impact on the environment of reverse osmosis systems and ways to regenerate filters with the possibility of their reuse. Currently, there are no companies or organizations in Ukraine that would collect and dispose of such filters. This direction is undeveloped. There are practically no corresponding data in the scientific literature. If you take into account the fact that, according to our calculations, about 88,000 domestic reverse osmosis systems are in use today in Kyiv alone, it is easy to calculate that 176,000 polypropylene cartridges with a total volume of 105 m³ of polypropylene enter the environment during the year.

The article presents method of regeneration of mechanical filters from iron compounds and other harmful impurities deposited on the surface and pores of the filter during operation. Studies of the jet sulfuric acid as a cleaner have confirmed its effectiveness and sufficient safety for further processing of cleaning products as an additive to cement. To establish the minimum residual concentration of iron in the mother liquor, a cycle of experiments was conducted and it was established that pH 4.0-4.5 can be considered optimal, at which the content of iron ions is at the level of their content in drinking water. There was made an estimation of acid. Technologies of large-scale cleaning used filters can be beneficial and cost-effective..

The results of the experimental study make it possible to develop a treatment plant with an automated system for dosing acid and measuring acidity.

Keywords: reverse osmosis, cartridge, mechanical filter, regeneration solution, neutralization, filtering, sulfuric acid.

1. Pollution of rivers of Ukraine: causes and consequences, 2019. [Online]. Available: <https://ns-plus.com.ua/2019/07/10>.

2. M. M. Girol, A. M. Girol, V. E. Khomko, and D. M. Kovalskyi. 2016. [Online]. Available: <http://polypipe.info>.

3. Y.V. Radovenchik and M.D. Gomelya Physico-chemical methods of water purification: a textbook. Kyiv: Condor Publishing House, 2016. 264 p.

4. Cartridge polypropylene PP 10" [Online]. Available: <https://www.aqua-ua.com/ua/product/kartridzh-polipropilenovyy-pp-10-1-mkm/>

5. Improved set of Ecosoft 1-2-3 cartridges for reverse osmosis filters (CHV3ECO). [Online]. Available: <https://ecosoft.ua/ua/uluchshennyi-komplekt-kartridzhey-ecosoft-1-2-3-dlya-filtra-obratnogo-osmosa/>

6. Set of 1-2-3 Ecosoft cartridges for reverse osmosis filters. [Online]. Available: <https://bt.rozetka.com.ua/dlya-sistem-obratnogo-osmosa/c196454/>

7. Set of cartridges Ecosoft CPV3ECOSTD. Characteristic. [Online]. Available: https://bt.rozetka.com.ua/ecosoft_dlya_filjtrov_obratnogo_osmosa_cpv3ecostd/p24577196/

8. Ecosoft foamed polypropylene cartridge 2.5"x10" [Online]. Available: <https://filterhome.com.ua/ua/p1081498458-kartridzh-spinenogo-polipropilenu.html>

9. Improved set of cartridges for reverse osmosis Aqualite Premium. [Online]. Available: <https://vodavdom.ua/ua/Product/2264>

10. Ecosoft foamed polypropylene cartridge 4.5"x20" (CPV452020ECO). [Online]. Available: <https://ecosoft.ua/ua/kartridzh-iz-vspenennogo-polipropilena-ecosoft-4-5-x20-20-mkm/>

12. FilmTec Reverse Osmosis/Nanofiltration Membranes. [Online]. Available: <https://www.dupont.com/content/dam/dupont/amer/us/en/water-solutions/public/documents/en/RO-NF-FilmTec-Manual-45-D01504 -en.pdf>

13. Ordering filter installation or maintenance[Online]. Available: <https://ecosoft.ua/ua/services/>

14. Reverse osmosis service. [Online]. Available: <https://vencon.ua/ua/catalog/servis-obratnogo-osmosa>

15. Goronovsky I. T., Nazarenko Yu. P., Nekryach E. F. Short reference book of chemistry. Kyiv: Institute of the Academy of Sciences of the Ukrainian SSR, 1962. 660 p.

Надійшла: 6.02.2023

Received: 6.02.2023