

УЗАГАЛЬНЕНИЙ ПОКАЗНИК ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРОПРИВОДА

У статті розглядаються методичні засади визначення узагальненого показника як критерію ефективності процесу електромеханічного перетворення енергії електроприводом, використання якого необхідне для енергетичної оптимізації електропривода. Наведено баланс потужностей потоків енергії для енергетичного каналу електропривода, ККД послідовного енергетичного каналу та приклад розрахунку узагальненого показника енергоефективності енергетичного каналу електропривода для статичних режимів двигуна постійного струму незалежного збудження.

Ключові слова: енергозбереження, показник енергоефективності, електропривод, коефіцієнт корисної дії, електричний баланс.

Вступ. На даний час для реалізації одного і того ж технологічного процесу, є можливість застосування різних технічних рішень в кінематиці виконавчих механізмів, у структурній і принциповій схемах побудови систем автоматизованого електроприводу, а також алгоритмах та принципах їх управління. При всьому різноманітті технічних рішень з'являється потреба в адекватній оцінці і порівняльній характеристиці кожного з них, в першу чергу – за показником енергетичної ефективності.

Аналіз попередніх досліджень. Оцінювання енергоефективності електропривода є комплексним завданням з великою кількістю характеристик і факторів, що на нього впливають (механічне навантаження, якість напруги живлення, технічний стан, умови навколишнього середовища, якість технічного обслуговування тощо). Від правильної оцінки енергетичної ефективності електропривода залежать багато відповідальних рішень - технічні, економічні, кон'юнктурні. Тим часом традиційні критерії асинхронного електроприводу - ККД і $\cos\phi$, не завжди дозволяють належним чином оцінити енергетичні процеси в електроприводі. Труднощі при їх використанні виникають і при вирішенні завдань енергозбереження в електроприводі. ККД і $\cos\phi$ характеризують енергетичний процес, пов'язаний з втратами, ККД - перетворення, $\cos\phi$ - споживання. Але вони мають різні визначальні співвідношення і фізичний зміст. Тому оптимізувати процес доводиться за цими показниками окремо. Порушується спільність оцінки, не кажучи вже про відступ від одного з основних принципів системного підходу - оптимальність частин не означає оптимальності цілого [1].

При виведенні узагальненого показника енергетичної ефективності розглядаємо нерозгалужений енергетичний канал (рис.1), що складається з розподільної мережі, силових передавально-перетворювальних елементів, робочого органу, технологічного об'єкта. Структурну схему енергетичного каналу електропривода зображено на рис. 1 [2].



Рисунок 1 – Структура енергетичного каналу електропривода (PM – розподільна мережа, EP – електричний перетворювач, EMP – електромеханічний перетворювач, ПМ – передавальний механізм, ВМ – виконавчий механізм, РО – робочий орган, ТО –технологічний об'єкт (вантаж))

Процес передачі і перетворення енергії в силовому каналі супроводжується її частковою втратою в кожному з елементів (ΔW) незалежно від напрямку її передачі. В остаточному підсумку втрати енергії виділяються у вигляді теплоти.

Всі елементи енергетичного каналу здатні накопичувати енергію в тому чи іншому вигляді в залежності від типу елемента:

- на індуктивностях накопичується енергія магнітного поля;
- на ємностях – енергія електричного поля;
- на пружних елементах і піднятих над землею масах – потенційна механічна енергія;
- на обертових і масах, що лінійно рухаються, – кінетична енергія [3].

Складемо баланс потужностей потоків енергії для енергетичного каналу електропривода з урахуванням кінетичної енергії мас, що рухаються, вважаючи, що зміна потенціальної енергії в системі не відбувається

$$P_e = \sum_i J_i \omega_i \frac{d\omega_i}{dt} + \sum_j m_j V_j \frac{dV_j}{dt} + \sum_k \Delta P_k + M\omega + FV,$$

де P_e – електрична потужність потоку енергії між джерелом електроенергії і розподільною ділянкою мережі; $\sum_i J_i \omega_i \frac{d\omega_i}{dt}$ і $\sum_j m_j V_j \frac{dV_j}{dt}$ – потужності, що виникають у динамічних режимах і пов'язані зі зміною кінетичної енергії обертових мас, що лінійно рухаються; $\sum_k \Delta P_k$ – сумарні втрати потужності у всіх елементах силового кола; $M\omega$, FV – потужності механічної енергії, пов'язані з обертальним і поступальним рухом.

Складові рівняння можуть мати різні поєднання рівнів, напрямків енергій і знаків, визначаючи тим самим різноманіття енергетичних станів енергетичного каналу, розмаїтість режимів його роботи. Згорнемо структурну схему привода з урахуванням рівняння балансу потужностей потоків енергії (рис. 2) [4].

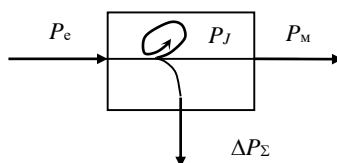


Рисунок 2 - Структурна схема привода з урахуванням рівняння балансу потужностей потоків енергії

Показані позитивні напрямки потоків потужності: P_e - електричної потужності; P_m - механічної потужності; P_J - потужності, пов'язаної зі зміною запасу кінетичної енергії механічної частини; ΔP_Σ - сумарної потужності втрат.

Кожна зі складових потужності має самостійне значення для аналізу енергетики електропривода. Так, P_e і $\int P_e dt$ – характеризують відповідно витрати потужності й енергії; P_m і $\int P_m dt$ – механічну потужність і корисну роботу; ΔP_Σ і $\int \Delta P_\Sigma dt$ – потужність втрати і енергію процесу нагрівання елементів силового каналу.

Коефіцієнт корисної дії визначається як відношення корисної роботи (енергії) на виході пристрою до витраченої енергії на вході

$$\eta = \frac{W_{\text{кор}}}{W_{\text{вит}}}.$$

Якщо робота пристрою оцінюється за період часу, протягом якого потужності на виході і вході постійні, то ККД

$$\eta = \frac{P_{\text{кор}}}{P_{\text{вит}}}.$$

При змінному характері навантаження за цикл роботи t_u значення ККД [5]

$$\eta = \frac{\int_0^{t_u} P_{\text{кор}} dt}{\int_0^{t_u} P_{\text{кор}} dt + \int_0^{t_u} \Delta P_{\Sigma} dt} .$$

Для послідовного енергетичного каналу вихід попереднього елемента ($P_{\text{кор}}$) є входом наступного ($P_{\text{вит}}$), тому ККД визначається добутком

$$\eta_{\Sigma} = \prod_{i=1}^n \eta_i .$$

Визначення енергетичного стану електропривода здійснюється порівнянням фактичних параметрів з їх сталонними значеннями [6].

Недостатність урахування за допомогою ККД властивостей електропривода лише як перетворювача енергії і неврахування характеристик як її споживача спричиняє потребу розробки нових підходів до процесів енергоспоживання і енерговикористання [7].

Матеріал і результати досліджень. Для цього представимо енергетичний канал у вигляді послідовно сполучених елементів (рис. 3).

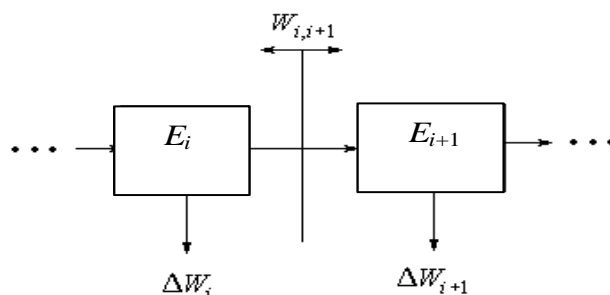


Рис. 3 Енергетичний канал електропривода

Корисна механічна робота, реалізована електроприводом, пов'язана такими процесами:

- зміною потенційної енергії технологічного об'єкта;
- зміною кінетичної енергії об'єкта;
- зміною внутрішньої енергії об'єкта;
- зміною геометричних розмірів об'єкта [8].

Технологія виконання корисної роботи і параметри елементів силового каналу електропривода визначають кількість енергії $W_{i,i+1}$, якою обмінюються "сусідні" елементи, і кількість енергії, що втрачається в кожному елементі ΔW_j [9].

Визнання корисною не лише енергії, переданої від джерела до механізму, що виконує механічну роботу (підйом вантажу), але й енергії, що надходить від механізму (спуск); точна вказівка перетину енергетичного каналу ($i, i+1$), для якого виробляється оцінка ефективності; елементів каналу, у яких враховуються втрати; інтервалу часу, для якого справедлива оцінка, дозволили одержати узагальнений критерій у такому вигляді

$$H = \frac{W_{i,i+1}}{W_{i,i+1} + \sum_j \Delta W_j} ,$$

де $W_{i,i+1} = \int_{t_1}^{t_1+\tau} |P_{i,i+1}(t)| dt$ – енергії обміну між сусідніми елементами силового каналу за період

оцінки, обумовлені даним режимом і параметрами каналу; $|P_{i,i+1}(t)|$ – модуль потужності цього потоку енергії;

$$\sum_j \Delta W_j = \sum_j \int_{t_1}^{t_1+\tau} \Delta P_j(t) dt - \text{сумарні втрати енергії у вибраних } j \text{ елементах силового каналу; } P_{i,i+1}(t)$$

- корисна потужність, що проходить через $i, i+1$ перетин енергетичного каналу; $\Delta P_j(t)$ - втрати потужності в j -му елементі; t_1, τ - початок і кінець часового інтервалу, в окремому випадку $t_1=0$ і τ - час циклу.

Визначимо, наприклад, узагальнений показник для статичних режимів двигуна постійного струму незалежного збудження (рис. 4).

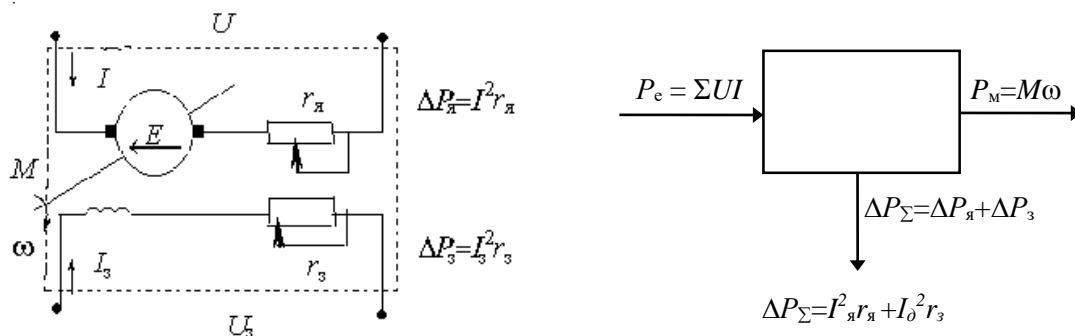


Рисунок 4 – Схема двигуна постійного струму незалежного збудження

Візьмемо до уваги лише втрати в двигуні, обумовлені тепловим розсіюванням енергії в якірному колі. Баланс потужностей для статичного режиму якірного кола двигуна визначається рівністю

$$UI = M\omega + I^2 r_a,$$

де $UI = P_e$ – електрична потужність на вході двигуна (споживана); $P_M = M\omega$ – механічна; $I^2 r_a$ – втрати в якірному колі.

Енергія, споживана по колі збудження, у процесі перетворення енергії не бере участі, вона необхідна лише для підтримки магнітного потоку машини.

Зв'язок між швидкістю і моментом двигуна

$$\omega = \frac{UI - I^2 r_a}{M},$$

або з урахуванням $M = k\Phi I$, механічна характеристика (рис. 5)

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{Mr_a}{(k\Phi)^2},$$

де $\omega_0 = \frac{U}{k\Phi}$; $M_{кз} = k\Phi I_{кз}$; $I_{кз} = \frac{U}{r_a}$.

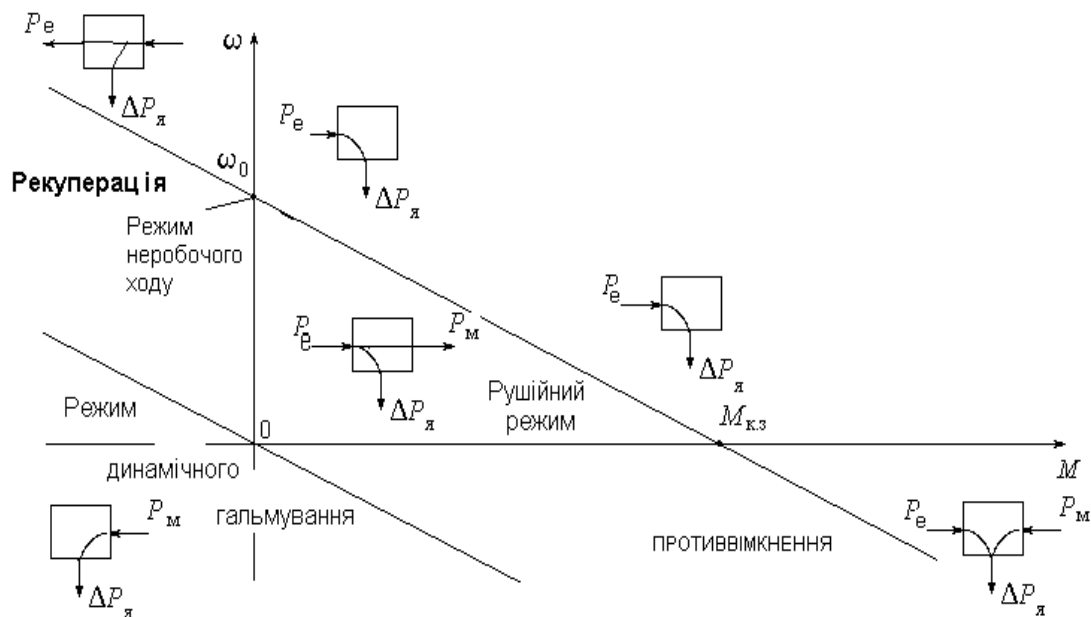


Рисунок 5 – Механічна характеристика двигуна постійного струму незалежного збудження

Приймемо в першому випадку $W_{i,i+1}$ як енергію на електричному вході машини

$$W_{i,i+1} = \int_{t_1}^{t_1+\tau} UI dt ,$$

в другому – як енергію на механічному вході

$$W_{i,i+1} = \int_{t_1}^{t_1+\tau} M\omega dt .$$

Оцінюючи значення узагальненого критерію для статичних режимів, замість енергії $W_{i,i+1}$ підставимо відповідні потужності. При цьому потужність втрат у якорі

$$\Delta P_{\text{я}} = I^2 r_{\text{я}} = UI - M\omega = M(\omega_0 - \omega) .$$

Стосовно електричного і механічного входів одержимо відповідно

$$H_e = \frac{|UI|}{|UI| + |M(\omega_0 - \omega)|} = \frac{|M\omega_0|}{|M\omega_0| + |M(\omega_0 - \omega)|} ,$$

$$H_m = \frac{|M\omega|}{|M\omega| + |M(\omega_0 - \omega)|} .$$

Залежності $H_e(\omega)$ і $H_m(\omega)$ показані на рис. 6.

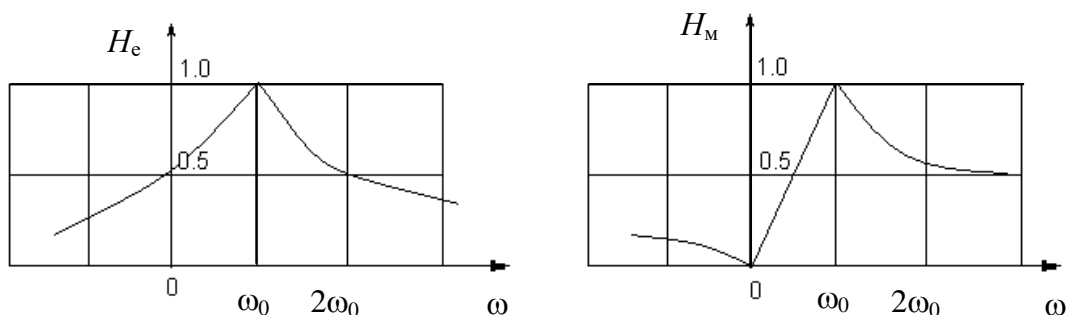


Рисунок 6 – Залежності коефіцієнтів $H_e(\omega)$ і $H_m(\omega)$

Коефіцієнт H_e оцінює ефективність двигуна як споживача енергії, а H_m – як перетворювача енергії. Проаналізуємо їх зміну для характерних режимів двигуна.

Для прийнятих умов ($\Delta P_b = 0$) у режимі вільного ходу, тобто при $\omega = \omega_0$ $H_e = H_m = 1$, оскільки втрати дорівнюють нулю. У рекуперативному режимі ($\omega > \omega_0$) обидва показники знижуються, причому ефективність машини стосовно мережі H_e падає швидше, ніж H_m . У рушійному режимі $0 < \omega < \omega_0$ значення H_e і H_m знижуються, однак значення H_m знижується швидше, приймаючи при $\omega = 0$ значення $H_m = 0$, а $H_e = 0,5$. При $\omega < 0$ значення H_m зростає до 0,5, а H_e прагне до нуля (режим противімкнення). Для режиму динамічного гальмування $H_e = 0$ (двигун не зв'язаний з мережею $P_e = 0$), а $H_m = 0,5$, оскільки завжди $\Delta P_y = P_m$.

При урахуванні постійних втрат (не залежних від режиму роботи силового каналу) жоден з показників не може досягти значення рівного одиниці. При будь-якій фізичній реалізації системи втрати неминучі. Найбільшому значенню H повинні відповідати найменші втрати енергії

$$\Delta W_\Sigma = \int_0^T \Delta P_\Sigma dt \rightarrow \min,$$

де T - час виконання корисної механічної роботи $W_{\text{пол}}$, що визначається необхідною продуктивністю.

Граничним значенням коефіцієнта ефективності $H_{\text{гр}}$ для електропривода з даними параметрами є його значення при найменших можливих втратах $\Delta W'_\Sigma$, відповідних виконанню заданої роботи при $P_{i,i+1} = \text{const}$ і $W_{\text{пол}}/T = P_{\text{пол}} = \text{const}$. Наприклад, для перетину “робочий орган – технологічний об’єкт”

$$H_{\text{пр}} = \frac{W_{\text{пол}}}{W_{\text{пол}} + \Delta W'_\Sigma}.$$

Висновок. Щоб вирішити, яка система електропривода в енергетичному відношенні має перевагу, чи всі елементи силового каналу цілком завантажені, наскільки вдало обрано спосіб керування, як електропривод взаємодіє з джерелом енергії, необхідно застосувати узагальнений показник енергетичної ефективності електропривода. Розглянутий спосіб визначення енергетичних індикаторів електропривода на основі узагальненого показника дозволяє більш повно і точно оцінити його енергетичний стан в порівнянні з традиційними ККД та $\cos\phi$, а також враховує властивості електропривода як перетворювача та споживача енергії.

Список використаної літератури.

1. Ермолаев С.А. Эксплуатация энергооборудования в сельском хозяйстве / С.А. Ермолаев, Е.П. Масюткин, В.Ф. Яковлев. – Киев: Фирма “Инкос”, 2005. – 670 с.
2. И. Я. Браславский. Энергосберегающий асинхронный электропривод / И. Я. Браславский, З.И. Ишматов, В.Н. Поляков. – Москва, Асадема 2004, 256 с.
3. Закладний О.М. Электропривод: навч. посіб. / О.М. Закладний, В.В. Прокопенко, О.О. Закладний. –К.: НТУУ «КПІ», 2007. – 316 с
4. П.В. Тютеева Оценка стоимости асинхронных двигателей при изменении геометрии поперечного сечения / П.В. Тютеева, О.О. Муравлева // Известия Томского политехнического университета. 2010. Т. 316. № 4, с.183-186
5. Д.И. Родькин. Системы динамического нагружения и диагностики электродвигателей при послеремонтных испытаниях / Д.И. Родькин – М.: недра, 1992. – 236 с.
6. Закладний О.О. Методика функціонального діагностування енергоефективності асинхронного електропривода. Енергетика: економіка, технології, екологія. 2013. №1, с. 79-84.
7. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей / И.А. Сыромятников; под ред. Л.Г. Мамиконянца. – 4-е изд., переработ. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 240 с.
8. Котеленец Н.Ф. Испытания, эксплуатация и ремонт электрических машин: Учебник для вузов / Н.Ф. Котеленец, Н.А. Акимова, М.В. Антонов. – М.: Издательский центр “Академия”, 2003. – 384 с.

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

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

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

GENERALIZED INDEX OF ENERGY EFFICIENCY OF ELECTRIC DRIVE

The article deals with the methodological basis for determining the generalized indicator as a criterion for the efficiency of the process of electromechanical energy conversion by an electric drive, the use of which is necessary for the energy optimization of the electric drive. The balance of the power fluxes for the power channel of the electric drive, the efficiency of the serial energy channel and the example of calculating the generalized energy efficiency index of the power channel of the electric drive for the static conditions of the DC motor of independent excitation are given.

In order to decide which power system the power system has an advantage, whether all elements of the power channel are fully loaded, how well the chosen way of controlling how the electric motor interacts with the power source, it is necessary to apply a generic indicator of the energy efficiency of the electric drive. The considered method of determining the energy indicators of the electric drive on the basis of the generalized indicator allows more accurately and accurately estimate its energy status in comparison with the traditional efficiency and $\cos\phi$, and also takes into account the properties of the electric drive as a converter and consumer of energy.

Key words: energy saving, energy efficiency index, electric drive, efficiency, electric balance.

References

1. Ermolaev S.A. Operation of power in agriculture / S.A. Ermolaev, E.P. Masyutkyn, V.F. Yakovlev. – Kiev: Fyrma "Ynkos", 2005. – 670 p.
2. Y. Ya. Braslavskyy. Energy-saving asynchronous electric drive/ Y. Ya. Braslavskyy, Z.Y. Yshmatov, V.N. Polyakov. – Moskva, Academia 2004, 256 p.
3. Zakladnyi O.M. Electric drive: teach. guidance / O.M. Zakladnyi, V.V. Prokopenko, O.O. Zakladnyi. – K.: NTUU «KPI», 2007. – 316 p.
4. P.V. Tyuteva. Valuation of asynchronous motors when changing the cross-sectional geometry / P.V. Tyuteva, O.O. Muravleva // Yzvestyya Tomskoho polytekhnycheskoho unyversyteta. 2010. V. 316. # 4, p.183-186
5. D.Y. Rod'kyn. Systems of dynamic loading and diagnostics of electric motors with post-repair tests / D.Y. Rod'kyn – M.: Nedra, 1992. – 236 p.
6. Zakladnyi O.O. Methods of functional diagnostics asynchronous electric energy. Enerhetyka: ekonomika, tekhnolohiyi, ekolohiya. 2013. #1, p. 79-84.
7. Syromyatnykov Y.A. Modes of operation of asynchronous and synchronous motors / Y.A. Syromyatnykov; edited by L.H. Mamykonyantsa. – 4th ed. revised and enlarged. – M.: Energoatomisdat, 1984. – 240 p.
8. N.F. Kotelenets, N.A. Akimova, and M.V. Antonov, Tests, operation and repair of electric machines: Textbook for high schools, Moscow, Russia: Publishing Center "Academy", 2003.

УДК 621.311.001.57(063)

О.А. Закладной, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0003-2813-3692

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

Национальный технический университет Украины

«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

ОБОБЩЕННЫЙ ПОКАЗАТЕЛЬ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

В статье рассматриваются методические основы определения обобщенного показателя как критерия эффективности процесса электромеханического преобразования энергии электроприводом, использование которого необходимо для энергетической оптимизации электропривода. Приведены баланс мощностей потоков энергии для энергетического канала электропривода, КПД последовательного энергетического канала и пример расчета обобщенного показателя энергоэффективности энергетического канала электропривода для статических режимов двигателя постоянного тока независимого возбуждения.

Ключевые слова: энергосбережение, показатель энергоэффективности, электропривод, Коэффициент полезного действия, электрический баланс.

Надійшла 18.10.2017

Received 18.10.2017

ТЕХНОЛОГІЇ ТА ОБЛАДНАННЯ В ЕНЕРГЕТИЦІ ENERGY TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT

УДК 338.246.025:621.311

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

Ю В. Чернецька, асист., ORCID 0000-0001-6821-3211

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

КРИТЕРІЇ ОЦІНЮВАННЯ РОЗВИТКУ СИСТЕМ РОЗПОДІЛУ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В УМОВАХ СТИМУЛЮЮЧОГО РЕГУЛЮВАННЯ

Вивчення досвіду європейських країн показало, що поступове перетворення розподільних електричних мереж на інтелектуальні електроенергетичні системи (Smart Grid) в умовах лібералізації електроенергетичного ринку можливе лише за рахунок ефективної взаємодії регулятора та операторів систем розподілу (ОСР). Стаття присвячена вирішенню проблеми аналізу та оцінювання регулятором ринку результатів діяльності ОСР щодо забезпечення розвитку електричних мереж. Розвиток окремої системи розподілу електроенергії розглядається як комплексна задача, пов'язана зі зміною чотирьох ключових характеристик системи розподілу: «технічний стан», «надійність», «завантаженість» та «інноваційність». Проведено аналіз інформаційного забезпечення розвитку систем розподілу у розрізі зазначених характеристик на рівні регулятора та на рівні ОСР. Оцінювання характеристик технічного стану та надійності під час узгодження інвестиційних програм (ІП) ліцензіатів достатньо формалізовано, тоді як завантаженість та інноваційність потребують більш детального опрацювання. Достовірність звітних даних ОСР визнана основним недоліком існуючого інформаційного забезпечення.

За кожною із характеристик розвитку систем розподілу для регулятора запропоновано відкритий перелік показників та критеріїв оцінювання, застосування яких сприятиме створенню передбачуваних вимог до забезпечення розвитку систем розподілу електроенергії, а також акцентуватиме увагу ОСР на пріоритетних напрямках державної політики.

Ключові слова: система розподілу електроенергії, оператор системи розподілу, регулювання, критерії оцінювання

Вступ. Лібералізація електроенергетики та поширення джерел розосередженої генерації актуалізували нові завдання енергетичної політики держави, а саме регулювання цін на монопольних ринках сільових послуг та забезпечення узгодженості інвестицій у генеруючі потужності з інвестиціями у об'єкти електричних мереж [1]. Аналітичні огляди Міжнародного енергетичного агентства [2] та Європейської електроенергетичної асоціації EURELECTRIC [3] свідчать, що поступове перетворення систем розподілу електроенергії на інтелектуальні електроенергетичні системи (Smart Grid) можливе лише за умови ефективної взаємодії регулятора та ОСР, що на правах власності здійснюють розвиток електричних мереж. Але у кожній країні Європейського Співтовариства (ЄС) ця система взаємодії вибудована по-різному та регулюється законодавством національного рівня [4, 5].

Для електроенергетики України концепція Smart Grid залишається орієнтиром для розвитку електричних мереж, визначеним ще у [6] і в решті підтриманим новою енергетичною стратегією України на період до 2035 року «Безпека. Енергоефективність. Конкурентоспроможність» [7]. У рамках імплементації положень Директиви 2009/72/ЄС прийнято Закон України «Про ринок електричної енергії», що ввів у законодавче поле поняття «оператор системи розподілу», «розвиток систем розподілу»; наступним етапом розробляється Кодекс систем розподілу. Проте конкретні механізми взаємодії регулятора та ОСР, які б сприяли поширенню технологій Smart Grid, враховували і досвід країн ЄС, і існуючий технічний стан та рівень автоматизації розподільних електричних мереж в Україні, ще належить розробити.

Аналіз літературних джерел та постановка проблеми. Smart Grid (інтелектуальна мережа) – це електрична мережа, що задовольняє майбутнім вимогам щодо енергоефективності та економічності функціонування енергосистеми за рахунок скоординованого керування і за допомогою сучасних двосторонніх комунікацій між елементами електричних мереж, електричними станціями, акумулюючими джерелами та споживачами [6]. Серед найважливіших для інвестування технологій Smart Grid у країнах ЄС визнано: автоматизацію електричних мереж (90% респондентів), інтелектуальний облік (90%), управління

попитом/розосереджена генерація (75%), віртуальні електростанції (40%), акумулюючі потужності (40%), електромобілі (30%), інше (15%) [3].

З метою створення привабливого інвестиційного клімату для розвитку та модернізації об'єктів електроенергетики в Україні передбачено здійснити перехід від тарифоутворення за правилом «витрати плюс» до стимулюючого регулювання ОСР. Протягом 2013-2016 років Національною комісією, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг (НКРЕКП), було підготовлено необхідні нормативні документи і згідно індикативного графіку планується до 2019 року її застосування до 42 основних ОСР України [8].

Необхідно відзначити, що сам по собі перехід до стимулюючого регулювання зовсім не означає перетворення розподільних електричних мереж України на інтелектуальні електроенергетичні системи, а лише створює передумови для збільшення обсягів нового будівництва, реконструкції та технічного переоснащення об'єктів електричних мереж. Аналіз у статті [9] імперичних даних 8 найбільших європейських комунальних електропостачальників у період з 1985 по 2010 роки показав, що після запровадження стимулюючого регулювання зростання обсягів інвестування у науково-дослідні роботи (НДР) не відбулося. В зазначеній роботі автори відзначають негативний вплив приватизації європейських ОСР на обсяги інвестицій у НДР, про що йдеться також у публікаціях [10, 11]. Разом з тим, результати аналізу інвестиційної діяльності ОСР Німеччини [12] свідчать, що після переходу до стимулюючого регулювання у 2009 році, обсяги інвестицій у розвиток електричних мереж не зменшувалися.

Таким чином, впровадження в Україні стимулюючого регулювання є необхідною, але не достатньою умовою для поступового переходу до інтелектуальних електроенергетичних систем, бо як показано в [11, 13] потрібні також механізми, що на рівні регулятора створюватимуть стимули для інноваційної діяльності і реалізації пілотних проектів Smart Grid. В [14] було визначено бар'єри для впровадження технологій Smart Grid, а саме: «витрати та вигоди», «знання», «інституційні механізми», також було запропоновано ряд рекомендацій, зокрема: прийняття різноманітності рішень (1), прийняття поступових змін (2), впровадження стабільної нормативно-правової бази (3), узгодження інтересів окремих учасників ринку з усією системою (4), визначення відповідних правил (5) і збір інформації (6).

Більшість авторів [2-5, 11, 13-14] відзначають, що ключова роль у переході до технологій Smart Grid належить ОСР, що на правах власників електричних мереж забезпечують розвиток систем розподілу. Тому стимулююче регулювання обов'язково передбачає застосування регулятором індивідуальних та/або загальних показників ефективності операційних та/або капітальних витрат ОСР [3, 5]. Саме від того, якими будуть контрольні показники і як буде вибудована подальша взаємодія НКРЕКП з ОСР, у значній мірі залежатиме траєкторія розвитку систем розподілу електроенергії в Україні.

Детальний аналіз методів економічного регулювання ОСР європейських країн представлено у дисертаційному дослідженні R. Cossent [15], де особлива увага приділяється методам регулювання на засадах порівняльного аналізу – бенчмаркінгу, запропонована класифікація методів бенчмаркінгу. Залежно від наявності або відсутності у регулятора достовірної інформації про діяльність ОСР автор пропонує дві групи методів: методи «еталону» та методи «чорної скриньки». У першому випадку, регулятор встановлює для кожного ОСР індивідуальні показники ефективності, за результатами моделювання самої системи розподілу електроенергії та відповідних оптимізаційних розрахунків. У другому випадку, регулятор розглядає систему розподілу як «чорну скриньку» з певним складом вхідних та вихідних змінних параметрів, а ефективність ОСР оцінюється шляхом порівняння фактичних досягнень реальних учасників ринку. Аналіз систем регулювання ОСР у європейських країнах [3, 5] дозволяє зробити висновок, що більшість регуляторів використовують бенчмаркінг методами «чорної скриньки», і з 2010 року лише у Великобританії відбувся перехід до системи регулювання за досягнутими результатами (output based regulation). Застосування зазначеної системи регулювання створює додаткові стимули для поширення технологій Smart Grid, проте потребує значних регуляторних зусиль і має ризики мікроменеджменту на рівні регулятора.

Враховуючи існуючий рівень автоматизації обліку електроенергії у системах розподілу електроенергії України, бенчмаркінг ОСР доцільно розглядати методами «чорної скриньки». Один із методів порівняльного аналізу діяльності ОСР розглядався у попередньому дослідженні авторів [16], де було запропоновано систему критеріїв рейтингування електропередавальних організацій України, проте склад критеріїв обмежувався показниками, наведеними у «Програмі розвитку електричних мереж напругою 35-110 (150) кВ та визначення обсягів реконструкції електричних мереж напругою 0,4-10 кВ на 2012-2015 роки». Доопрацювання запропонованих раніше критеріїв дозволить надати НКРЕКП інструмент для комплексного аналізу ефективності інвестиційної діяльності ОСР з точки зору поступового переходу до інтелектуальних електроенергетичних систем. При цьому, критерії оцінювання повинні відображати ключові характеристики розвитку систем розподілу електроенергії в Україні: «технічний стан», «надійність», «завантаженість» та «інноваційність», визначені авторами в [17] шляхом проведення PEST-аналізу.

Мета роботи - розробити критерії оцінювання розвитку систем розподілу електроенергії в Україні шляхом аналізу їх ключових характеристик: «технічний стан», «надійність», «завантаженість» та

«інноваційність», для бенчмаркінгу ОСР, що дозволить в умовах стимулюючого регулювання підвищити ефективність управлінських рішень щодо розвитку електромереж та сприятиме поширенню технологій Smart Grid в Україні.

Виклад основного матеріалу

1. Модель оцінювання розвитку систем розподілу електроенергії в Україні

В об'єднаній енергосистемі (ОЕС) України функції розподілу електроенергії виконують лінії електропередавання (ЛЕП) та трансформаторні підстанції (ТП) з вищою напругою до 150 кВ (рис. 1), розділені, переважно, за адміністративно-територіальним принципом на локальні (місцеві) електричні мережі. Кожен із 40 ОСР діє на закріпленій території згідно ліцензії НКРЕКП і, як зазначено в Законі України «Про ринок електричної енергії», несе відповідальність за безпечну, надійну й ефективну експлуатацію, технічне обслуговування та розвиток системи розподілу електроенергії.

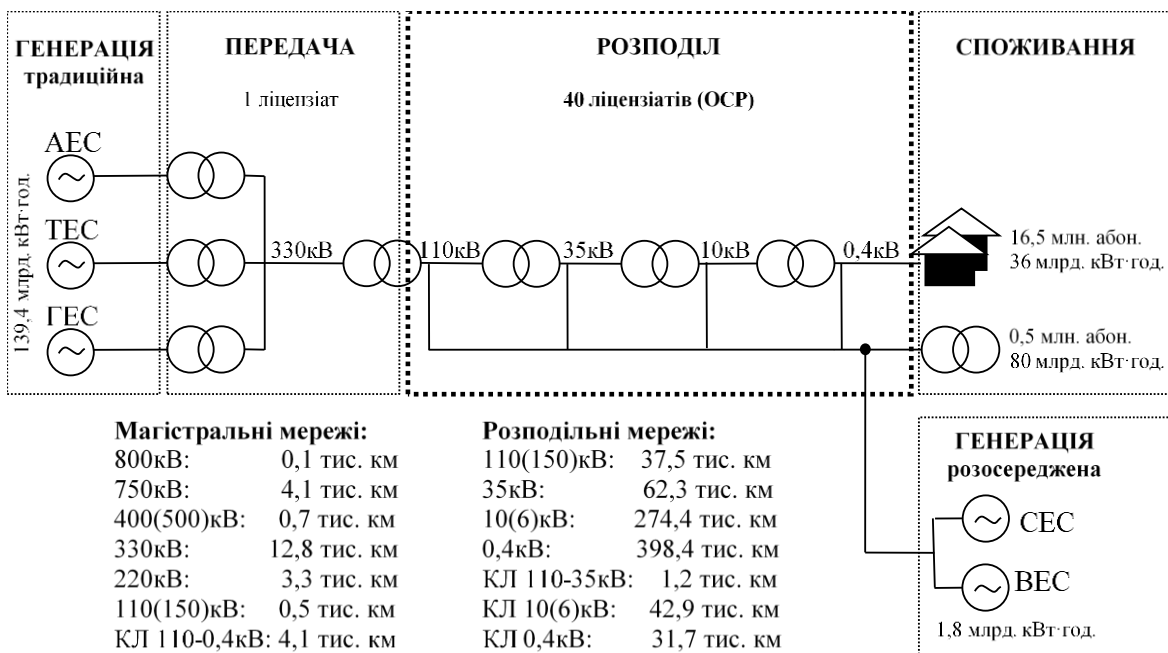


Рисунок 1 - Протяжність електричних мереж в ОЕС України (кількісні показники 2016 р. згідно річного звіту НКРЕКП)

Поняття «розвиток системи розподілу», що використовується у законодавчому полі, на даний момент чітко не визначене. За аналогією із визначенням терміну «розвиток ОЕС України», під «розвитком системи розподілу» будемо розуміти нове будівництво, реконструкцію або технічне переоснащення об'єктів електричних мереж - ЛЕП та ТП напругою до 150 кВ. Це ж визначення, але для поняття «розвиток електричних мереж», використовувалося раніше у Законі України «Про електроенергетику».

Потреба у розвитку системи розподілу електроенергії виникає за умови впливу одного або декількох із наступних факторів:

- (1) поява на території здійснення ліцензійної діяльності ОСР нових споживачів/виробників електричної енергії;
- (2) зміна обсягів споживання/виробництва електроенергії існуючими споживачами/виробниками;
- (3) необхідність заміни технічно і/або морально застарілого обладнання об'єктів електромереж;
- (4) зміна вимог споживачів до якості надання послуг з розподілу електроенергії.

Оцінюючи результати діяльності ОСР щодо забезпечення розвитку системи розподілу, регулятору необхідно враховувати, що лише фактор (3) безпосередньо залежить від ефективності господарської діяльності конкретного власника електромереж. Фактори (1), (2) та (4) пов'язані із попитом на послуги розподілу електроенергії на території здійснення ліцензійної діяльності. У даному випадку, важливо фіксувати як ліцензіат відповідає на запити користувачів системи розподілу щодо приєднання до електричних мереж та якості надання послуг.

З огляду на значну протяжність розподільних електричних мереж (рис. 1) та низький рівень їх автоматизації регуляторна політика НКРЕКП повинна вибудовуватися, виходячи із факту наявності асиметрії інформації між регулятором та ліцензіатами. Тобто регулятор визнає відсутність доступу до повної та об'єктивної інформації про функціонування електричних мереж і розглядає кожну систему розподілу S_i у

якості «чорної скриньки» з деяким набором вхідних та вихідних параметрів. Співвідношення між вхідними та вихідними параметрами дозволяє проаналізувати ефективність системи розподілу; крім того у регулятора з'являється можливість у деякій мірі порівнювати результати діяльності різних ОСР.

У статті пропонується модель оцінювання розвитку системи розподілу електроенергії, що у спрощеному вигляді представлена на рис. 2. Вхідними параметрами системи (W_{input}) є кількісні показники попиту на послуги розподілу електроенергії, зумовлені факторами (1), (2) та (4). Результатом функціонування системи (W_{output}) є кількість розподіленої електроенергії. На роботу системи розподілу можуть також впливати випадкові чинники (U_k), наприклад, погодні фактори, вплив сторонніх осіб тощо. Проте ключові характеристики розвитку системи розподілу - технічний стан (T), надійність (R), завантаженість (L) та інноваційність (I) залежать від ефективності господарської діяльності ОСР.

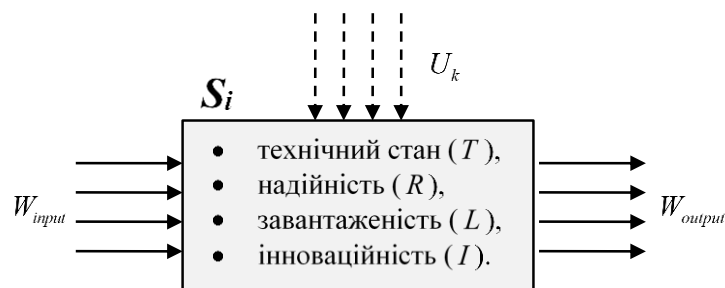


Рисунок 2 - Оцінювання розвитку системи розподілу електроенергії: модель «чорна скринька»

Характеристика *технічний стан* (T) відображає стан ремонтно-експлуатаційного обслуговування об'єктів електричних мереж і потребує уваги зі сторони органів державної влади, зокрема, через тривале недофінансування робіт з технічного обслуговування та капітальних ремонтів.

Характеристика *надійність* (R) - вказує на здатність системи розподілу виконувати необхідні функції в заданих режимах і умовах експлуатації. Зниження рівня надійності означає для ОСР невідпуск електроенергії і відповідно недоотримання грошових надходжень від користувачів системи.

Характеристика *завантаженість* (L) показує відповідність пропускну здатності системи розподілу електроенергії попиту користувачів послуг, тобто чи відповідають перерізи ЛЕП та встановлена потужність трансформаторів існуючим та перспективним електричним навантаженням у нормальному та післяаварійному режимах роботи схеми електромереж. Обсяг електроспоживання в Україні після майже 40% падіння так і не досягнув рівня базового 1991 року, що означає надлишок пропускну здатності електричних мереж. Проте наявні резерви не завжди є саме в тих енерговузлах системи розподілу, де зростає обсяг електроспоживання або приєднана потужність розосереджених джерел енергії.

Характеристика *інноваційність* (I) відображає застосування новітніх технологій та обладнання під час нового будівництва, реконструкції або технічного переоснащення електричних мереж. Йдеться про підвищення енергетичної ефективності систем розподілу електроенергії: застосування нових типів силового устаткування; нових засобів релейного захисту і протиаварійної автоматики, діагностики обладнання, обліку енергоресурсів; систем моніторингу і керування режимами мережі та обладнанням, в тому числі використання технологій Smart Grid.

Взаємодія НКРЕКП та ОСР з метою забезпечення розвитку систем розподілу електроенергії реалізується через інвестиційні програми (ІП) ліцензіатів, що містять обґрунтування запланованих капіталовкладень і витрат. Регулятор узгоджує ІП кожного ОСР та встановлює величину тарифу на розподіл електроенергії. І оскільки кожна ІП переглядається, як правило, один раз на рік, то для річного горизонту планування ($t = 1$) задачу управління розвитком системи розподілу в межах території здійснення ліцензійної діяльності ОСР можемо сформулювати у вигляді цільової функції (1).

$$\Delta W = W_{input} - W_{output} = f(T, R, L, I) \rightarrow \min . \quad (1)$$

Теоретично, у результаті виконання ІП, ОСР повинен покращити характеристики технічного стану, надійності, завантаженості та інноваційності системи розподілу. При цьому, визначальним обмеженням цільової функції (1) є кількість грошових коштів, які ОСР спрямовує на розвиток системи розподілу в t -му році: $III \leq III_t$. У рамках запропонованої моделі регулятор, узгоджуючи ІП, зможе також встановити обмеження, пов'язані з характеристиками розвитку системи розподілу: $T_{t-1} \leq T \leq T^*$, $R_{t-1} \leq R \leq R^*$, $L_{t-1} \leq L \leq L^*$, $I_{t-1} \leq I \leq I^*$, тобто спрогнозувати покращення кожної характеристики відносно показників попереднього року і їх зміну у напрямку деякого «ідеального» значення - X^* .

Далі, для розроблення критеріїв оцінювання, важливо дослідити наявну інформацію про розвиток систем розподілу електроенергії як на рівні регулятора, так і на рівні ОСР.

2. Інформаційне забезпечення розвитку систем розподілу

ОСР надають звітну інформацію про результати своєї роботи до Міністерства енергетики та вугільної промисловості України, до НКРЕКП та до Державної інспекції енергетичного нагляду України, що повинно, з однієї сторони, послабити наглядовий тиск на суб'єктів господарювання, а з іншої – посилити відповідальність ОСР за виконання умов ліцензійної діяльності. Необхідно також відзначити, що протягом останніх років посилюються вимоги до ОСР щодо публікування на офіційних сайтах компаній інформації про план розвитку системи розподілу, виконання ПП та надання послуг приєднання до електричних мереж новим споживачам електроенергії.

Нормативні документи, що регулюють звітність ОСР:

(1) Наказ Міністерства палива та енергетики України № 352 від 01.07.2008 р. Про затвердження Переліку форм звітності Міністерства палива та енергетики України;

(2) Постанова НКРЕКП № 345 від 23.03.2017 р. Про затвердження форм звітності №11-НКРЕКП (квартальна) «Звіт щодо показників надійності електропостачання» та №12-НКРЕКП (квартальна) «Звіт щодо показників комерційної якості надання послуг» та інструкцій щодо її заповнення;

(3) Постанова НКРЕ № 1627 від 13.12.2012 р. Про затвердження порядку формування інвестиційних програм ліцензіатів з передачі та постачання електричної енергії (у редакції від 10.09.2017 р.).

Звітність ОСР згідно (1) охоплює усі чотири характеристики розвитку систем розподілу електроенергії (рис. 3). Інформація за формами статистичної звітності 56-, 57-, 58- та 59-енерго має узагальнений характер за групами об'єктів електричних мереж з диференціацією за рівнями напруги (ЛЕП: 110-150 кВ, 35 кВ, 6-20 кВ, та до 1 кВ; ТП: 110-150 кВ, 35 кВ; 6-20 кВ). Інформація за формами 60-енерго та 61-енерго – пооб'єктна, тобто вказується назва та протяжність ЛЕП, номери та потужності ТП, які були реконструйовані чи збудовані у звітному періоді. Завантаженість системи розподілу не оцінюється, проте є дані згідно форми 35-енерго про споживання електроенергії, 36-енерго про погодинне навантаження у режимний робочий день, 68-енерго про загальну характеристику за групами споживачів електроенергії (за договорами).

Звітність згідно (2) дає змогу оцінити результати діяльності ОСР як надавача послуг. Інформація за формою 11-НКРЕКП щодо показників надійності електропостачання деталізована за чотирма основними рівнями напруги: 110/154 кВ, 27,5-35 кВ, 6-20 кВ, 0,4 кВ. Інформація за формою 12-НКРЕКП містить дані про звернення споживачів: з метою отримання доступу до електричної мережі; питань, пов'язаних із обліком електроенергії; скарги щодо якості електроенергії або перерв в електропостачанні.

Нормативний документ (3) містить вимоги публічного обговорення ПП ліцензіатів; шаблон ПП значною мірою дублює форми звітності з переліку (1), що мають обмежений доступ.

Технічний стан	Надійність	Завантаженість	Інноваційність
<p>56-енерго: технічний стан електромереж, 58-енерго: капітальний ремонт об'єктів електромереж, 59-енерго: технічне обслуговування об'єктів електромереж</p>	<p>11-НКРЕ: показники надійності електропостачання, 57-енерго: технологічні порушення, 63-енерго: забезпечення нормативного рівня надійності</p> <p>звітність на державному рівні</p>	<p>35-енерго: споживання електроенергії, 36-енерго: погодинне навантаження у день режимних вимірів, 12-НКРЕ: комерційна якість послуг (звернення про доступ до мереж)</p>	<p>60-енерго: виконання Програми розвитку електромереж, 61-енерго: виконання інвестиційної програми, 67-енерго: організація систем обліку електроенергії</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Тривалість використання обладнання, • Пооб'єктна оцінка технічного стану 	<ul style="list-style-type: none"> • Пооб'єктна оцінка наслідків відмов, • Досвід експлуатації обладнання мереж <p>внутрішня інформація ОСР</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Дані диспетчера щодо роботи схеми електромереж, • Однолінійна схема 	<ul style="list-style-type: none"> • Типи використаних інновацій, • Витрати-вигоди реалізованих проектів

Рисунок 3 - Результати аналізу інформаційного забезпечення розвитку систем розподілу електроенергії

Звітність ліцензіатів на державному рівні формується на основі внутрішньої інформації ОСР – більш деталізованої та змістовної (рис. 3). Проте у регулятора також акумулюються значні масиви звітних даних, краще опрацьовані за характеристиками «технічний стан» та «надійність», менш формалізовані на даний час за характеристиками «завантаженість» та «інноваційність».

Основним недоліком інформаційного забезпечення розвитку систем розподілу залишається достовірність наданих регулятору даних. Так, аналіз статистичної звітності про технічний стан об'єктів електричних мереж, результати якого представлені в [18], показав значний вплив суб'єктивних факторів на результати оцінювання і неможливість перевірити узагальнені звітні дані. Розрахунки показників надійності та комерційної якості згідно (2) виконуються самими ОСР. У якості джерел інформації можуть бути використані журнали обліку або електронні бази даних, що так само ставить під сумнів достовірність значної частини звітних показників. Тому, якщо у майбутньому формуватиметься інтегральний показник розвитку системи розподілу, то видається доцільним ввести вагові коефіцієнти значущості критеріїв, залежно від джерела отримання інформації.

Крім того, звітні дані ОСР показали, що системи розподілу електроенергії в Україні суттєво відрізняються між собою за складом споживачів, площею та географічними особливостями території обслуговування, протяжністю ЛЕП та співвідношенням між кабельними і повітряними лініями, темпами зростання електричного навантаження та часткою розосередженої генерації. Зазначені особливості також важливо врахувати під час розроблення критеріїв оцінювання – використовувати відносні чи питомі показники, відстежувати динаміку їх значень.

3. Система критеріїв оцінювання розвитку систем розподілу

На основі аналізу інформаційного забезпечення розвитку систем розподілу електроенергії в Україні (п. 2) та враховуючи досвід країн ЄС [5] для регулятора пропонуємо критерії оцінювання у розрізі характеристик технічного стану, надійності, завантаженості та інноваційності.

3.1 Критерії оцінювання технічного стану

Для об'єктів електричних мереж напругою до 20 кВ характеристика технічного стану визначає необхідні обсяги ремонтно-експлуатаційних робіт ОСР. «Добрий» технічний стан означає, що об'єкт підлягає технічному обслуговуванню; «задовільний» технічний стан - об'єкт підлягає капітальному ремонту; «незадовільний» технічний стан означає реконструкцію об'єкта, а у випадку «непридатного» технічного стану об'єкт потребує заміни.

Статистична звітність ОСР (56-енерго) дозволяє визначити частку ЛЕП, що підлягають реконструкції та заміні, по відношенню до їх загальної протяжності (k_{T1}) на кожному з основних чотирьох рівнів напруги, і може бути представлена у вигляді системи показників: $k_{T1} = \{k_{T1}^{0.4}, k_{T1}^{10}, k_{T1}^{35}, k_{T1}^{110}\}$.

Аналогічно можна оцінити технічний стан ТП за кількісними показниками (k_{T2}) та за встановленою потужністю (k_{T3}). Щоб застосувати зазначені кількісні параметри у якості критеріїв оцінювання результатів діяльності ОСР, доцільно відслідковувати тенденції зміни показників. Логічно припустити, що зменшення значення параметрів k_{Ti} , порівняно з попереднім роком, означає покращення технічного стану об'єктів електричних мереж відповідного рівня напруги (табл. 1). При цьому, ідеальне значення показників k_{Ti}^* рівне нулю, що означає відсутність на балансі ОСР об'єктів, що потребують реконструкції або заміни.

Таблиця 1 - Критерії k_T , що відображають зміни технічного стану

Показники	Застосування у якості критерію розвитку системи розподілу
$k_{T1} = \{k_{T1}^{0.4}, k_{T1}^{10}, k_{T1}^{35}, k_{T1}^{110}\}$	$\Delta_{T1} = k_{T1}^t - k_{T1}^{t-1} < 0$
$k_{T2} = \{k_{T2}^{10}, k_{T2}^{35}, k_{T2}^{110}\}$	$\Delta_{T2} = k_{T2}^t - k_{T2}^{t-1} < 0$
$k_{T3} = \{k_{T3}^{10}, k_{T3}^{35}, k_{T3}^{110}\}$	$\Delta_{T3} = k_{T3}^t - k_{T3}^{t-1} < 0$

У якості додаткових показників економічного спрямування можуть бути використані статистичні дані форм 58-енерго та 59-енерго. Наприклад, грошові витрати ОСР на виконання робіт з технічного обслуговування та капітальних ремонтів по відношенню до загальної кількісної оцінки електричних мереж (в умовних одиницях, загальній протяжності ЛЕП або . Напряму використати зазначені вартісні показники у якості критеріїв розвитку електричних мереж практично неможливо, бо збільшення витрат на обслуговування мереж лише опосередковано свідчить про можливе покращення їх технічного стану.

3.2 Критерії оцінювання надійності системи розподілу електроенергії

Важливими даними для оцінювання надійності системи розподілу є показники форми 12-НКРЕ, що розраховуються на різних рівнях напруги та з диференціацією за типом місцевості (міська/сільська). Ряд показників можуть бути використані напряму: індекс середньої тривалості довгих перерв в електропостачанні *SAIDI* (k_{R1}), індекс середньої частоти довгих перерв *SAIFI* (k_{R2}), індекс середньої частоти коротких перерв *MAIFI* (k_{R3}). А розрахунковий обсяг недовідпущеної електроенергії *ENS* доцільно зіставляти із загальним обсягом відпуску електроенергії (k_{R4}).

До переліку показників надійності систем розподілу (табл. 2) також включено k_{R5} - відношення кількості аварійних відключень в мережах ліцензіата до загальної протяжності ЛЕП (відкл./100 км).

Ідеальним значенням для усіх показників надійності k_{Ri}^* є нуль, що означає відсутність будь-яких перерв у роботі системи розподілу електроенергії. Для застосування показників надійності у якості критеріїв розвитку систем розподілу пропонуємо відстежувати їх динаміку, тобто зменшення значення параметрів k_{Ri} порівняно із попереднім роком означатиме підвищення надійності системи розподілу.

Таблиця 2 - Критерії k_{Ri} , що відображають зміни надійності системи розподілу

Показники	Застосування у якості критерію розвитку системи розподілу
$k_{R1} = \{k_{R1}^{0,4c}, k_{R1}^{0,4m}, k_{R1}^{10c}, k_{R1}^{10m}, k_{R1}^{35}, k_{R1}^{110}\}$	$\Delta_{R1} = k_{R1}^t - k_{R1}^{t-1} < 0$
$k_{R2} = \{k_{R2}^{0,4c}, k_{R2}^{0,4m}, k_{R2}^{10c}, k_{R2}^{10m}, k_{R2}^{35}, k_{R2}^{110}\}$	$\Delta_{R2} = k_{R2}^t - k_{R2}^{t-1} < 0$
$k_{R3} = \{k_{R3}^{0,4c}, k_{R3}^{0,4m}, k_{R3}^{10c}, k_{R3}^{10m}, k_{R3}^{35}, k_{R3}^{110}\}$	$\Delta_{R3} = k_{R3}^t - k_{R3}^{t-1} < 0$
$k_{R4} = \{k_{R4}^{0,4c}, k_{R4}^{0,4m}, k_{R4}^{10c}, k_{R4}^{10m}, k_{R4}^{35}, k_{R4}^{110}\}$	$\Delta_{R4} = k_{R4}^t - k_{R4}^{t-1} < 0$
$k_{R5} = \{k_{R5}^{0,4}, k_{R5}^{10}, k_{R5}^{35}, k_{R5}^{110}\}$	$\Delta_{R5} = k_{R5}^t - k_{R5}^{t-1} < 0$

Перелік критеріїв надійності (табл. 2) може бути доповнений на основі показників форми 57-енерго щодо технологічних порушень цехового обліку та форми 63-енерго щодо дотримання нормативного рівня надійності електропостачання споживачів. Питання оптимальної кількості критеріїв надійності потребує додаткового вивчення.

3.3 Критерії оцінювання завантаженості

Показники завантаженості дозволяють зробити висновок про відповідність між встановленою потужністю трансформаторів та попитом на електричну енергію в поточному році. Для узагальненої оцінки пропонуємо використати два показника, що застосовуються у практиці країн ЄС [5]: коефіцієнт використання встановленої потужності трансформаторів (2) та коефіцієнт завантаження системи розподілу (3).

Розрахункова формула для визначення коефіцієнта використання встановленої потужності трансформаторів:

$$k_{L1} = \frac{W_{e\dot{d}n}^{cn} \cdot 100\%}{S_{\Sigma}^{III} \cdot T}, \quad (2)$$

де $W_{e\dot{d}n}^{cn}$ - обсяг електроенергії, відпущеної споживачам на низькому ступені напруги, тис. кВт·год.; S_{Σ}^{III} - сума встановленої потужності усіх трансформаторів, використаних для розподілу електроенергії, МВА; $T = 8760$ год. – кількість годин роботи системи розподілу в рік.

Таким чином, k_{L1} відображає ефективність планування системи розподілу електроенергії. Низьке значення показника $k_{L1} < k_{L1}^{\min}$ означає, що ОСР використовує трансформатори значно більшої за необхідну встановленої потужності, а отже завищує капітальні витрати. Проте деяке оптимальне значення показника k_{L1}^* повинно визначатися експертним шляхом для конкретної системи розподілу, бо $k_{L1} > k_{L1}^{\max}$

може спричинити зменшення її надійності. Тоді критерієм розвитку системи розподілу слугуватиме щорічне скорочення різниці між фактичним та оптимальним значенням показника (табл. 3).

Таблиця 3 - Критерії k_L зміни завантаженості системи розподілу

Показники	Застосування у якості критерію розвитку системи розподілу
$k_{L1} = \{k_{L1}^{OCP}; k_{L1}^{PEM1}, k_{L1}^{PEM2}, \dots, k_{L1}^{PEMn}\}$	$ k_{L1}^t - k_{L1}^* < k_{L1}^{t-1} - k_{L1}^* $
$k_{L2} = \{k_{L2}^{OCP}; k_{L2}^{PEM1}, k_{L2}^{PEM2}, \dots, k_{L2}^{PEMn}\}$	$ k_{L2}^t - k_{L2}^* < k_{L2}^{t-1} - k_{L2}^* $

Коефіцієнт завантаження системи розподілу електроенергії («load factor» у [5]):

$$k_{L2} = \frac{W_{відн}^{EM}}{P^{\max} \cdot T}, \quad (3)$$

де $W_{відн}^{EM}$ - обсяг відпущеної в мережу електроенергії, тис. кВт·год.; P^{\max} - пікове навантаження системи розподілу електроенергії протягом року, МВт; $T = 8760$ год. – кількість годин роботи системи розподілу в рік.

Значення показника дає можливість оцінити наскільки ефективно використовується обладнання системи розподілу і в деякій мірі допомагає зрозуміти наскільки система розподілу близька до перевантаження. Чим вище значення, тим ефективніше використовуються наявні потужності і навпаки. Проте якщо значення наближається до 100%, система досягає ліміту за піковим навантаженням і не може забезпечити нові приєднання споживачів. Із врахуванням приросту навантаження для системи розподілу доцільно встановлювати експертним шляхом деяке оптимальне значення коефіцієнта завантаження k_{L2}^* , тоді критерієм розвитку системи розподілу слугуватиме щорічне скорочення різниці між фактичним та оптимальним значенням.

Обидва показники можуть бути розраховані не лише узагальнено для ОСР в цілому, а і для окремих районів електричних мереж: $k_{Li} = \{k_{Li}^{OCP}; k_{Li}^{PEM1}, k_{Li}^{PEM2}, \dots, k_{Li}^{PEMn}\}$.

3.4 Критерії оцінювання інноваційності

Показники інноваційності вводяться з метою оцінити застосування у процесі розвитку систем розподілу новітніх технологій та обладнання. Запропоновано критерії, що відображають зміни у засобах обліку енергоресурсів, показники прогресивності обладнання, а також нарощування обсягів розосередженої генерації.

k_{I1} - коефіцієнт оновлення засобів обліку. Розраховується як відношення оновлених у поточному році засобів обліку до загальної кількості засобів обліку на балансі ОСР станом на початок року. Чим вище значення показника k_{I1} , тим кращі результати ОСР за поточний рік. Для цього показника немає можливості визначити «ідеальне» значення, проте доцільно встановити деякий мінімальний поріг k_{I1}^{\min} , наприклад, щорічне оновлення не менше 1% засобів обліку. Оцінювання також може проводитися у розрізі підрозділів ліцензіата (табл. 4) зі встановленням різних граничних значень для різних районів електромереж.

Таблиця 4 - Критерії k_I зміни інноваційності системи розподілу

Показники	Застосування у якості критерію розвитку системи розподілу
$k_{I1} = \{k_{I1}^{OCP}; k_{I1}^{PEM1}, k_{I1}^{PEM2}, \dots, k_{I1}^{PEMn}\}$	$k_{I1} \geq k_{I1}^{\min}$
$k_{I2} = \{k_{I2}^{0,4}, k_{I2}^{10}, k_{I2}^{35}, k_{I2}^{110}; k_{I2}^{OCP}; k_{I2}^{PEM1}, \dots, k_{I2}^{PEMn}\}$	$\Delta_{I2} = k_{I2}^t - k_{I2}^{t-1} > 0$
$k_{I3} = \{k_{I3}^{0,4}, k_{I3}^{10}, k_{I3}^{35}, k_{I3}^{110}; k_{I3}^{OCP}; k_{I3}^{PEM1}, \dots, k_{I3}^{PEMn}\}$	$k_{I3} = 1$

Доповнити перший показник доцільно ще одним - k_{I2} - частка точок продажу електроенергії, обладнаних автоматизованими системами обліку. Ідеальне значення показника: $k_{I2}^* = 1$, збільшення значення показника, порівняно із попереднім роком, означає більш повне впровадження автоматизованих систем комерційного обліку електроенергії. Розрахунок можливий і для різних рівнів напруги, і у розрізі районів електромереж.

k_{I3} - частка реалізованих у визначені терміни приєднань до системи розподілу джерел розосередженої генерації, по відношенню до кількості відповідних звернень користувачів системи.

Ідеальне значення рівне одиниці $k_{I3}^* = 1$ означає, що усі запити користувачів системи про приєднання до електричних мереж джерел розосередженої генерації у поточному році були задоволені. Чим більшим є значення показника, тим краще ОСР реагує на запити про приєднання.

До переліку також можуть бути додані показники, що відображатимуть використання прогресивних технологій, визначених технічною політикою ОСР. Наприклад, частка нового обладнання, встановленого протягом останнього року для різних рівнів напруги, і у розрізі районів електромереж. Тоді критерієм розвитку системи розподілу буде зростання показника, порівняно із попереднім роком, а ідеальні значення рівні одиниці.

4. Аналіз результатів дослідження

В результаті проведених досліджень необхідно відмітити, що розроблення і застосування критеріїв оцінювання розвитку систем розподілу електроенергії матиме ряд переваг для усіх учасників ринку.

По-перше, системи розподілу електроенергії суттєво відрізняються між собою за складом споживачів, площею та географічними особливостями території обслуговування, темпами зростання електричного навантаження, часткою розосередженої генерації. Критерії оцінювання частково відображають зазначені відмінності та дозволяють НКРЕКП враховувати їх, аналізуючи і порівнюючи результати діяльності ОСР України.

По-друге, зв'язок між вхідними-вихідними змінними (рис. 2) та грошовими витратами ОСР не є прямолінійним, бо розвиток системи розподілу – багатоцільова задача, що охоплює і забезпечення достатньої пропускної спроможності системи, і надійність її функціонування, і скорочення технологічних витрат електроенергії, і ефективність ремонтно-експлуатаційних витрат. Саме *система критеріїв*, що базуються на ключових характеристиках розвитку системи розподілу, може відобразити комплексність вирішуваної кожним ОСР задачі і забезпечити глибокий аналіз результатів діяльності ліцензіатів.

По-третє, запропоновані критерії максимально враховують існуючу статистичну звітність ОСР, тож їх запровадження не потребує значних регуляторних зусиль. Склад критеріїв оцінювання може змінюватися і доповнюватися з метою забезпечення відповідності тим регуляторним цілям, що визначені як першочергові на конкретному етапі розвитку об'єднаної енергосистеми України. Разом з тим, автори наголошують на доцільності врахування достовірності звітних даних ОСР: під час формування інтегрованого показника розвитку системи розподілу надавати більшої ваги критеріям, розрахованим за даними, джерелом яких є автоматизовані системи обліку електроенергії.

По-четверте, система критеріїв оцінювання сприятиме створенню зрозумілих вимог зі сторони НКРЕКП щодо розвитку систем розподілу електроенергії, а також акцентуватиме увагу ОСР на пріоритетних напрямках державної політики. А ліцензіати зможуть застосовувати ті ж критерії оцінювання по відношенню до власних підрозділів електричних мереж, оперуючи більшою кількістю достовірних даних.

Висновки

1. Аналіз систем регулювання інвестиційної діяльності ОСР в країнах ЄС [3-5] та наукових публікацій [9-15] показав, що стимулююче регулювання тарифів на послуги розподілу електроенергії повинно обов'язково доповнюватися системою оцінювання ефективності операційних та/або капітальних витрат ОСР. При цьому, в різних країнах використовуються різні моделі оцінювання, залежно від існуючого рівня розвитку систем розподілу електроенергії та основних цілей, визначених регулятором ринку.

2. З огляду на значну протяжність розподільних електричних мереж в Україні та низький рівень їх автоматизації, для оцінювання розвитку систем розподілу запропонована модель чорної скриньки. У рамках запропонованої моделі регулятор аналізує і оцінює зміну чотирьох ключових характеристик розвитку системи розподілу: «технічний стан», «надійність», «завантаженість», «інноваційність», а також отримує можливість у деякій мірі порівнювати результати діяльності різних ОСР.

3. Оцінювання характеристик технічного стану та надійності під час узгодження ІІІ ліцензіатів достатньо формалізовано, тоді як завантаженість та інноваційність потребують більш детального опрацювання. Достовірність звітних даних ОСР визнана основним недоліком існуючого інформаційного забезпечення.

4. За кожною із характеристик розвитку систем розподілу запропоновано відкритий перелік показників та критеріїв оцінювання характеристик технічного стану, надійності, завантаженості та інноваційності. Їх застосування сприятиме створенню передбачуваних вимог регулятора до забезпечення розвитку систем розподілу електроенергії, а також акцентуватиме увагу ОСР на пріоритетних напрямках державної політики.

5. Наявність формалізованої системи оцінювання результатів інвестиційної діяльності ОСР в умовах стимулюючого регулювання дозволить підвищити ефективність управлінських рішень щодо розвитку систем розподілу та сприятиме поширенню технологій Smart Grid в Україні.

Список використаної літератури:

1. Biggar, D. R., Hesamzaden M. R. The economics of electricity markets. UK : John Willey & Sons Ltd, 2014. 432 p.
2. Energy technology perspectives 2017. Catalysing energy technology transformations. International Energy Agency, 2017. 443 p.
3. Electricity distribution investments: what regulatory framework do we need? EURELECTRIC report. Brussels, 2014. 43 p.
4. Ruester S., Schwenen S., Batlle C., Pérez-Arriaga I. From distribution networks to smart distribution systems: rethinking the regulation of European electricity DSOs. *Utilities Policy*. 2014. Vol. 31. P. 229–237. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jup.2014.03.007>
5. Study on tariff design for distribution systems: final report prepared for European Commission, Directorate-General for Energy, Directorate B – Internal Energy Market. 2015. 652 p. URL: https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/20150313%20Tariff%20report%20final_revREF-E.PDF
6. Стогній Б. С., Кириленко О. В., Праховник А. В., Денисюк С. П. Еволюція інтелектуальних електричних мереж та їхні перспективи в Україні. *Технічна електродинаміка*. 2012. № 5. С. 52-67.
7. Енергетична стратегія України до 2035 року: безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність, схвалена розпорядженням Кабінету Міністрів України від 18.08.2017 р. № 605-р. URL: <https://www.kmu.gov.ua/ua/npras/250250456>
8. Стимулює тарифоутворення : презентація НКРЕКП 18 листопада 2015 року. URL: <http://www.nerc.gov.ua/?news=4799>
9. Schmitt S., Kucsera D. The impact of the regulatory reform process on the R & D investment of European electricity utilities. *Review of Network Economics*. Vol. 13, Issue 1. 2014. P. 35-67. DOI: <https://doi.org/10.1515/rne-2012-0021>
10. Sterlacchini A. Energy R & D in private and state-owned utilities: an analysis of the major world electric companies. *Energy policy*. 2012. Vol. 41. P. 494-506. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.11.010>
11. Cambini C. Meletiou A., Bompard E., Masera M. Market and regulatory factors influencing smart-grid investment in Europe: evidence from pilot projects and implications for reform. *Utilities Policy*. 2016. Vol. 40. P. 36-47. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jup.2016.03.003>
12. Cullmann A. Nieswand M. Regulation and investment incentives in electricity distribution: an empirical assessment. *Energy economics*. 2016. Vol. 57. P. 192-203. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2016.05.007>
13. Marques V., Bento N., Moises Costa P. The “Smart Paradox”: stimulate the deployment of smart grids with effective regulatory instruments. *Energy*. 2014. Vol. 69. P. 93-106. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.01.007>
14. Muench S., Thuss S., Guenther E. What hampers energy system transformations? The case of smart grids. *Energy policy*. 2014. Vol. 73. P. 80-92. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.05.051>
15. Cossent R. A. Economic regulation of distribution system operators and its adaptation to the penetration of distributed energy resources and smart grid technologies : Doct. Dissert. Madrid, 2013. 265 p.
16. Чернецька Ю. В., Замулко А. І. Рейтингове оцінювання в задачах управління розвитком розподільних електричних мереж. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2013. №1. С. 94-100.
17. Чернецька Ю. В. Системи розподілу електроенергії в Україні: ключові характеристики їх розвитку. Матеріали XVIII міжн. наук.-практ. конф. *Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті*. 27-29.09.2017 р. К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, Інститут відновлюваної енергетики НАНУ, 2017. С. 70-75.
18. Чернецька Ю. В., Замулко А. І. Система моніторингу технічного стану розподільчих електричних мереж. *Енергосбереження. Енергетика. Енергоаудит*. 2011. №9. С. 28-37.

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

Yu. Chernetska, TF., ORCID 0000-0001-6821-3211

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

EVALUATION CRITERIA OF THE ELECTRICITY DISTRIBUTION SYSTEMS DEVELOPMENT UNDER INCENTIVE REGULATION

Studying the experience of European countries shows that step by step transformation from distribution networks to Smart Grids in the liberalized electricity market could be achieved only through the cooperation between the market regulator and distribution system operators (DSO). The paper deals with the problem of evaluation and estimation by market regulator the operational efficiency of the DSOs and their activities for distribution systems development. Authors consider the development of the particular distribution system as a multipurpose task connected with changes in the four characteristics of the electricity distribution system: “technical condition”, “system reliability”, “loading level” and “innovativeness”. The available information about distribution system development in terms of these characteristics was studied at the level of regulator and at the level of DSO. During finalization and approval the investment program, the regulator has well-formalized

information about technical condition and system reliability; however, information about loading level and innovativeness requires additional elaboration. Authors emphasize that data validity of the DSO's reports is the main information problem for the regulator.

For each characteristic of the distribution system development authors propose an open list of the indicators and evaluation criteria. Implementation of these criteria will help to create the transparent requirements for insurance the distribution systems development with a particular focus on priority regulatory policy.

Keywords: electricity distribution system, distribution system operator, regulation, evaluation criteria

References

1. Biggar, D. R., Hesamzaden M. R. The economics of electricity markets. UK : John Wiley & Sons Ltd, 2014. 432 p.
2. Energy technology perspectives 2017. Catalysing energy technology transformations. International Energy Agency, 2017. 443 p.
3. Electricity distribution investments: what regulatory framework do we need? EURELECTRIC report. Brussels, 2014. 43 p.
4. Ruester S., Schwenen S., Batlle C., Pérez-Arriaga I. From distribution networks to smart distribution systems: rethinking the regulation of European electricity DSOs. *Utilities Policy*. 2014. Vol. 31. P. 229–237. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jup.2014.03.007>
5. Study on tariff design for distribution systems: final report prepared for European Commission, Directorate-General for Energy, Directorate B – Internal Energy Market. 2015. 652 p. URL: https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/20150313%20Tariff%20report%20final_revREF-E.PDF
6. Stognii B. S., Kyrylenko O. V., Prahovnyk O. V., Denysiuk S. P. The evolution of intelligent electrical networks and their prospects in Ukraine. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2012. № 5. P. 52-67 (Ukr).
7. Energy Strategy of Ukraine until 2035 “Safety, Energy Efficiency, Competitiveness”, approved by the Cabinet of Ministers resolution No 605 dated on 18.08.2017. URL: <https://www.kmu.gov.ua/ua/npas/250250456>
8. Incentive regulation: presentation of the National Commission, which performs state regulation in the energy sector and utilities dated 18.11.2015. URL: <http://www.nerc.gov.ua/?news=4799>
9. Schmitt S., Kucsera D. The impact of the regulatory reform process on the R & D investment of European electricity utilities. *Review of Network Economics*. Vol. 13, Issue 1. 2014. P. 35-67. DOI: <https://doi.org/10.1515/rne-2012-0021>
10. Sterlacchini A. Energy R & D in private and state-owned utilities: an analysis of the major world electric companies. *Energy policy*. 2012. Vol. 41. P. 494-506. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.11.010>
11. Cambini C. Meletiou A., Bompard E., Masera M. Market and regulatory factors influencing smart-grid investment in Europe: evidence from pilot projects and implications for reform. *Utilities Policy*. 2016. Vol. 40. P. 36-47. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jup.2016.03.003>
12. Cullmann A. Nieswand M. Regulation and investment incentives in electricity distribution: an empirical assessment. *Energy economics*. 2016. Vol. 57. P. 192-203. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2016.05.007>
13. Marques V., Bento N., Moises Costa P. The “Smart Paradox”: stimulate the deployment of smart grids with effective regulatory instruments. *Energy*. 2014. Vol. 69. P. 93-106. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.01.007>
14. Muench S., Thuss S., Guenther E. What hampers energy system transformations? The case of smart grids. *Energy policy*. 2014. Vol. 73. P. 80-92. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.05.051>
15. Cossent R. A. Economic regulation of distribution system operators and its adaptation to the penetration of distributed energy resources and smart grid technologies : Doct. Dissert. Madrid, 2013. 265 p.
16. Chernetska Yu., Zamulko A. Rating for electrical distribution networks development. *Visnyk of Vinnytsia Politechnical Institute*. 2013. No 1. P. 94-100 (Ukr).
17. Chernetska Yu. Electricity distribution systems in Ukraine: key features of their development. Materials of the XVII-th International scientific and practical conference “Renewable energy and energy efficiency of the XXI century”. 27-29.09.2017. Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Institute of Renewable Energy at National Academy of Sciences of Ukraine, 2017. P. 70-75 (Ukr).
18. Chernetska Yu., Zamulko A. The monitoring system of the technical condition of the distribution electrical networks. *Energy saving. Power Engineering. Energy Audit*. 2011. No 9. P. 28-37 (Ukr).

Надійшла 19.12.2017

Received 19.12.2017

О.О. Вовк, д-р техн. наук, проф. ORCID 0000-0002-7531-9847
С.В. Зайченко, д-р техн. наук, проф. ORCID 0000-0002-8446-5408

Є.П. Чвортко, канд. техн. наук, доц.
М.В. Шевченко, канд. техн. наук, доц.
А.Є. Пірумов, канд. техн. наук, доц.

О.Й. Радецька, магістрант

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

АНАЛІЗ АВАРІЙ НА МАГІСТРАЛЬНИХ ТРУБОПРОВОДАХ ЗА ПЕРІОД 2005 – 2015 РР.

Трубопровідний транспорт широко застосовують для транспортування рідких речовин на великій відстані. Однак нерідко на трубопроводах виникають аварії внаслідок причин технологічного, технічного та суб'єктивного характеру, які призводять до забруднення значних територій, пошкодження майна та навіть людських жертв. У статті проаналізовано аварії на магістральних трубопроводах в Україні і США за період 2005 – 2015 рр. Встановлено, що аварії нерідко стають наслідком негативних процесів, які відбуваються в трубопроводі внаслідок дії експлуатаційних факторів, таких як корозія, старіння металу, механічні навантаження. Поряд з цим нерідко аварії виникають на ділянках трубопроводів, які в силу різного роду причин, у тому числі, законодавчого характеру, не були достатньою мірою охоплені контролем та інспекцією. Встановлено, що моніторинг технічного стану трубопроводів є ефективним засобом запобігання аваріям або зменшення їх впливу на довкілля. Однак його проведення, окрім економічних факторів, обмежене через особливості роботи сучасних засобів вимірювання.

Ключові слова: магістральний трубопровід, аварія, причина аварії, моніторинг технічного стану

Вступ

Транспортування рідких речовин за допомогою трубопроводів є одним із широко вживаних у світі засобів для їх доставки від виробника до споживачів, особливо коли відстань між ними є значною. Згідно Закону України «Про трубопровідний транспорт» магістральний трубопровід є технологічним комплексом, який функціонує як єдина система і до якого входить окремий трубопровід з усіма об'єктами і спорудами, зв'язаними з ним єдиним технологічним процесом, або кілька трубопроводів, якими здійснюються транзитні, міждержавні, міжрегіональні поставки продуктів транспортування споживачам [1]. В Україні трубопровідний транспорт використовують для перекачування нафти, нафтопродуктів, газу та аміаку. У порівнянні з іншими видами транспорту вони більш практичні та економічно доцільні для транспортування великих обсягів, однак привносять фактори небезпеки. Зокрема, існує ризик пошкодження трубопроводів, що може призвести до екологічного забруднення значних територій навколо нього. Нафтопродукти накопичуються в ґрунтових водах, системах каналізації, річках, озерах, колодязях та інших резервуарах природного і штучного походження. Як наслідок, все більші об'єми води є непридатними для вживання, відбувається миттєва загибель живих організмів та повільна деградація флори. При аварії на газопроводі чи нафтопроводі в атмосферу потрапляє метан та його гомологи, вуглекислий газ та пари нафти, які впливають на центральну нервову систему, органи дихання тварин та людей, крім цього підвищується парниковий ефект.

Метою даного дослідження є аналіз аварій на магістральних трубопроводах за період 2005 – 2015 рр. та їхніх причин, а також визначення можливих підходів до запобігання створенню аварійних ситуацій.

Аналіз причин аварій магістральних трубопроводів

За статистичними даними Державної служби України з надзвичайних ситуацій за період 2005 – 2015 рр. зафіксовано 34 аварії, з яких: на нафтопроводі – 13, на газопроводі – 14, на продуктопроводі – 6, на аміакопроводі – 1 [2]. Розподіл аварій в Україні за 2005 – 2015 рр за видами магістральних трубопроводів подано на рис. 1, а за областями країни – на рис. 2.

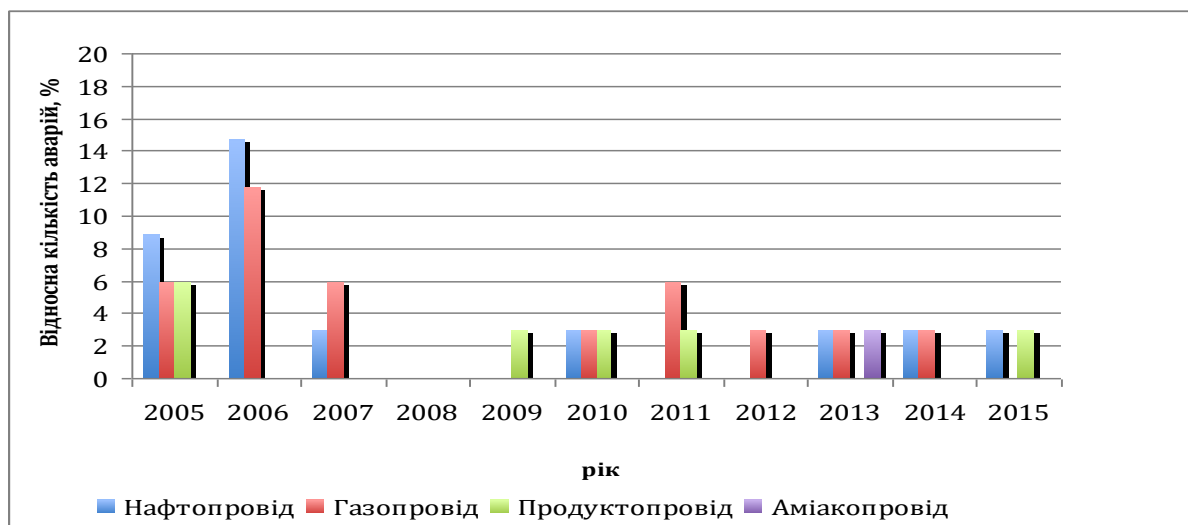


Рисунок 1 – Кількість аварій в Україні на магістральних трубопроводах у 2005 – 2015 рр.

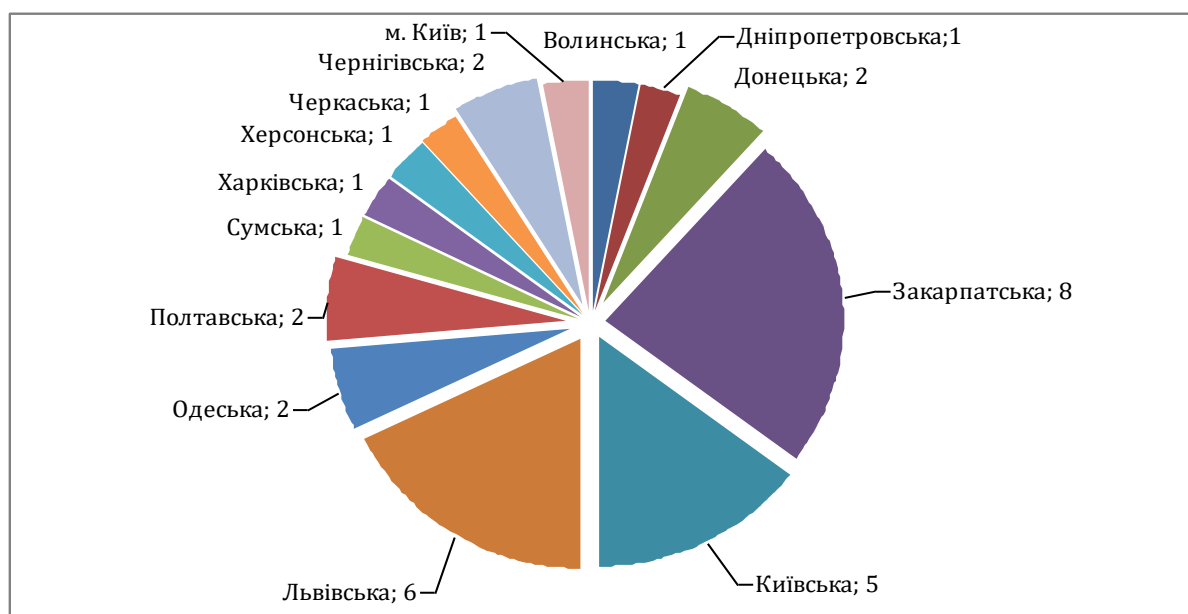


Рисунок 2. – Розподіл аварій по областям України у 2005 – 2015 рр.

Серед основних причин аварій, зокрема, виділено:

1. розгерметизацію трубопроводу внаслідок несанкціонованого врізання;
2. зношення трубопроводу (корозія);
3. порушення правил проведення земляних робіт;
4. зловмисне механічне пошкодження;
5. просідання ґрунту.
- 6.

Розглянемо аварії, які мали найбільший вплив на навколишнє середовище.

У 2013 р. поблизу с. Руське, Мукачівського району було виявлено маслянисту плівку на водній поверхні каналу "Полуй", яка виникла внаслідок витіку нафтопродуктів після несанкціонованого врізання невідомими зловмисниками на відстані 100 м від каналу. За результатами лабораторних гідрохімічних аналізів поверхневих вод вміст нафтопродуктів перевищував гранично допустиму концентрацію у 15 разів. Для запобігання поширення нафтопродукту вниз за течією каналу було встановлено боніві загородження, споруджено гідрозатвор, у місці аварії поверхневі води та ґрунт оброблено сорбентом "Еконадін".

Інша аварія в Закарпатській області сталася в 2014 р. поблизу с. Бенедиківці. З гілки магістрального нафтопроводу "Дружба" на магістралі "Броди Держжордон" діаметром 700 мм виявлено витік нафти за

межі охоронної зони, внаслідок чого утворилася масляниста пляма на площі близько 0,7 га (7000 м²). Витік нафтопродукту було зупинено та проведено роботи з очищення території (відкачування нафтопродуктів та вивезення забрудненого шару ґрунту).

У 2015 р. в Закарпатській області відбулася розгерметизація продуктопроводу ДП "Прикарпатзахідтранс", внаслідок чого у руслі річки Уж в районі с. Ворочевого виявили забруднення нафтопродуктами (дизпаливо) на площі поверхні водного дзеркала близько 300 м². Відстань від прокладання продуктопроводу до русла річки Уж становить 1,5 кілометра. З метою захисту водозабору міста Ужгород від потрапляння нафтопродуктів поблизу с. Кам'яниці було встановлено бонові загорожі. Причиною аварії була несанкціонована врізка у продуктопровід.

Звернемо увагу, що більшість факторів, які найчастіше ставали причинами аварій, неможливо передбачити при проектуванні трубопроводу. Зокрема, сучасні методики дозволяють врахувати фактори корозії та несприятливих змін, які відбуваються в металі труб у ході експлуатації (так званого, старіння металу), а також частково – вплив зсувів ґрунту, в той час як фактори суб'єктивного характеру залишаються поза увагою під час проектування.

Слід також зазначити, що найбільшою загрозою для магістральних трубопроводів на даний час в Україні є ситуація в зоні проведення антитерористичної операції на території Донецької та Луганської областей. З матеріалів Національної акціонерної компанії "Нафтогаз України" до Національної доповіді "Про стан техногенної та природної безпеки в Україні у 2016 році" за весь період в зоні АТО було виявлено 2504 пошкоджень розподільних газопроводів, крім цього інформація щодо ситуації на непідконтрольних територіях практично відсутня [3].

У світі ситуація із трубопроводами також є складною. Найбільша кількість аварій спостерігається в Сполучених Штатах Америки. Загальна кількість аварій трубопроводів за вказаний період склала 309 (рис. 3) [4], що майже в 10 разів перевищує дані по Україні. Кількість аварій на рік становила від 15 у 2007 році до 46 у 2012, в той час як в Україні найбільша кількість аварій на рік становила 3 (у 2007, 2010 та 2013 роках), а 2008 охарактеризувався відсутністю зафіксованих держслужбами країни аварій.

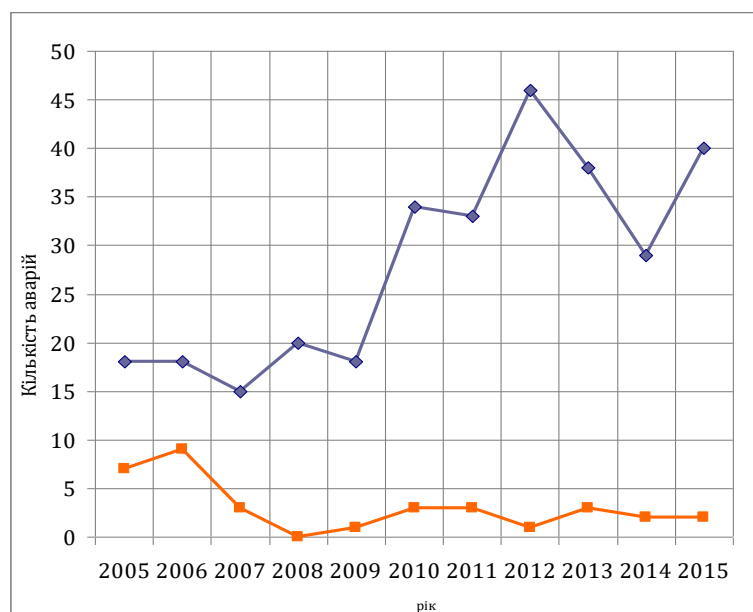


Рисунок 3 – Кількість аварій в США (синя лінія) та в Україні (помаранчева лінія) за 2005 – 2015 рр.

Аварії на газо- і нафтопроводах в США – не рідкість, багато з них призводять і до людських жертв [5, 6]. Одна із таких катастроф сталася 10 вересня 2010 року в м. Сан-Бруно, штат Каліфорнія, де відбувся потужний вибух сталевого газопроводу діаметром 76 см. Вибух залишив після себе кратер глибиною до 12 метрів, діаметром 51 м. Вісім осіб загинуло, понад п'ятдесят було поранено. Висота полум'я сягала 90 м, очевидці повідомляли про вогняну кулю і стіну вогню заввишки 300 м.

Геологічна служба США зареєструвала результат ударної хвилі еквівалентний землетрусу в 1,1 бал за шкалою Ріхтера. До ліквідації пожежі було залучено понад 200 пожежників – сильний вітер роздував полум'я, ускладнюючи боротьбу з вогнем. У результаті вибуху і подальшої пожежі було пошкоджено 35 будинків, три з них були визнані непридатними для проживання.

На загальну довжину всіх трубопроводів Америки – 2,5 млн км, щорічно припадає сотні витоків і розривів, ціною яких стають в окремих випадках і людські життя. З 1986 року, при аваріях на трубопроводах вже загинуло більше 500 осіб, а постраждало понад 4000. По мірі старіння трубопроводних

систем, ризик аварій на цих лініях буде тільки збільшуватися. Але більшості з них можна було б уникнути – при належному контролі з боку уряду і посиленню заходів безпеки в галузі.

Серед основних причин аварій називають корозію обладнання, незадовільну якість зварних швів і навіть стихійні лиха. Так, у 2012 році трубопроводи в штаті Нью-Джерсі піддалися атаці урагану "Сенді", що призвело до виникнення понад 1600 випадків розгерметизації трубопроводу.

Серйозною причиною виходу трубопроводів з ладу є корозія. Сталь, яка знаходиться у взаємодії з активними середовищами, такими як нафта чи газ – поступово деградує. На частку корозійних процесів припадає від 15 до 20 відсотків усіх повідомлень про "серйозні аварії", які призводять до загибелі людей або завдають серйозної шкоди майну.

Старіння металу трубопроводу (процес, який також призводить до негативних змін структури та властивостей матеріалу) також називають серед основних причин аварій. Більше половини трубопроводів в США побудовані більше п'ятдесяти років тому. Наприклад, у 2011 році, в місті Аллентаун вибухнув газопровід. Загибло 5 людей, було знищено майже п'ятдесят будинків. Причиною було перевищення терміну експлуатації – газопровід було виготовлено з чавунних труб у 1928 році. Слід зазначити, що проблема вичерпання ресурсу роботи магістральних трубопроводів внаслідок тривалої експлуатації актуальна і для України.

У США основну частину державного контролю за функціонуванням нафтопроводів і газопроводів покладено на невелике агентство в складі Департаменту транспорту "Pipelines and Hazardous Materials Safety Administration" (Управління з безпеки трубопроводів і небезпечних матеріалів), скорочено – PHMSA.

За даними агентства лише 7 % трубопроводів передачі природного газу і 44 % всіх небезпечних ліній передачі рідких нафтопродуктів відповідають жорстким критеріям перевірки і регулярно підлягають перевірці. Усі інші ділянки трубопроводів проходять контроль набагато рідше. Така ситуація склалась внаслідок того, що більшість федеральних законів про безпеку трубопроводів було прийнято у 60-ті і 70-ті роки, у той самий час було встановлено стандарти безпеки для новозбудованих ліній.

Однак на трубопроводи, побудовані раніше 60-х років, дані правила не поширювалися, до того ж (навіть для США) привести ці трубопроводи до єдиного стандарту безпеки неможливо. Саме до таких об'єктів належав газопровід, який вибухнув в місті Сан-Бруно. Ділянка, на якій лопнув трубопровід вздовж дефектного шва, як показало розслідування, ніколи не проходила випробувань підвищеним тиском. Але парадокс у тому, що, оскільки він був встановлений в 1956 році, його власник і не зобов'язаний був проводити таке тестування.

Пізніше, в 1990-х роках, були прийняті додаткові акти, і сьогодні PHMSA набирає персонал для тестування старих трубопроводів у зоні ризику. Однак багато старих газопроводів в сільській місцевості й досі не можуть бути охоплені інспекцією, а внаслідок величезної протяжності трубопроводів нафти і газу в Сполучених Штатах, PHMSA не вистачає ресурсів для ефективного моніторингу

Іншим елементом ризику трубопроводів є тимчасові і технічні лінії, наприклад магістралі, що з'єднують свердловини на родовищах. До них взагалі не застосовують жодні стандарти регулювання, оскільки багато з цих ліній працюють при дуже низьких тисках і знаходяться у віддалених районах. Тому урядові агенти не можуть зібрати об'єктивні дані про розриви й протікання, а також про те, чи дотримуються взагалі яких-небудь стандартів щодо характеристик зварних швів та глибини залягання трубопроводу.

Одним із шляхів вирішення такої ситуації є установка запірної арматури з автоматичним дистанційним управлінням, яка може швидко зупинити подачу газу або нафти в разі аварії.

У липні 2010 року, в результаті прориву нафтопроводу, в р. Каламазу витекло близько мільйона галонів сирої нафти. Операторам трубопроводу знадобилося майже 17 годин для того, щоб знайти і вручну перекрити місце розриву. Використання автоматичної арматури дозволило б значно скоротити цей час, а отже – зменшити масштаб екологічного забруднення місцевості.

Існує й інша технологія запобігання витокам і розривам. Для діагностики технічного стану трубопроводів в нафтогазовій промисловості використовують роботів – трубопровідні контрольно-вимірювальні пристрої під назвою "Smart Pig" (рис. 4).

Такі пристрої розміщують в газопроводі і вони рухаються в трубі, визначаючи деформації труб і пошкодження металу. Однак не кожен газопровід має відповідний діаметр для використання подібного пристрою [7]. Відомі також системи із датчиками для локального вимірювання механічних напружень у трубопроводах, які придатні до використання незалежно від діаметру трубопроводу [8]. Однак в обох випадках для регулярної діагностики потрібен частковий демонтаж конструкції.

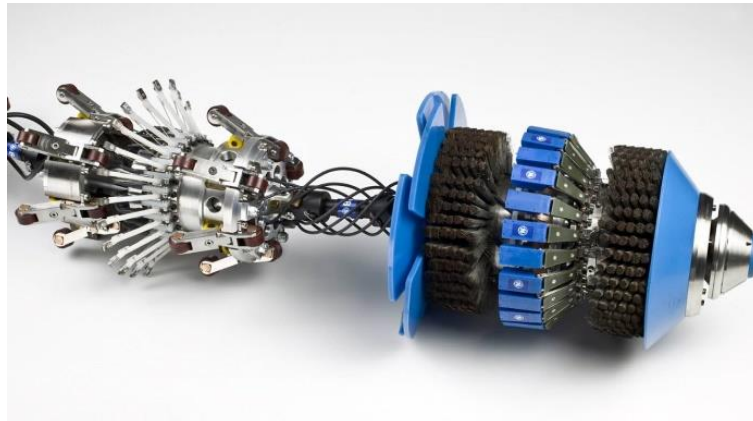


Рисунок 4 – Трубопровідний контрольно-вимірювальний пристрій “Smart Pig”

Висновки

1. Аварії на трубопроводах призводять до забруднення значних площ. Фактори, які спричиняють аварії, можна розділити на такі, що вносять на стадії проектування (неправильний вибір матеріалу, технології виготовлення, неврахування умов експлуатації), виготовлення (порушення технології, використання матеріалів незадовільної якості, недостатня увага контрольним заходам) та експлуатації (корозія, зовнішні механічні дії, старіння металу). В Україні серед причин аварій розповсюдженим є суб’єктивний фактор, пов’язаний із недбалим ставленням до трубопроводу або порушенням вимог до його експлуатації.

2. Діагностика і моніторинг технічного стану трубопроводів дозволяє уникнути настання аварійних ситуацій і підвищити екологічну безпеку трубопровідного транспорту. Однак навіть найсучасніші засоби і методи діагностики й моніторингу мають певні обмеження, а в деяких випадках інспекція трубопроводів є не обов’язковою згідно вимог чинного законодавства.

3. Попередити аварійні ситуації на трубопроводах можливо за рахунок впровадження ефективних методик контролю та інспекції на всіх стадіях життєвого циклу конструкції. Актуальною на сьогодні є розробка методик та засобів діагностики і моніторингу технічного стану магістральних трубопроводів. Зокрема, корисним буде визначення узагальнених вимог до проведення інспекції та критеріїв оцінювання, які були б придатними до застосування без обмежень технічного характеру.

Список використаної літератури

1. Закон України “Про трубопровідний транспорт” № 192/96 [Електронний ресурс]: прийнятий Верховною Радою України 15 травня 1996 р., зі змінами від 28.12.2015. – Київ. – Режим доступу: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/192/96-вр>.
2. Державна служба України з надзвичайних ситуацій [Електронний ресурс]. – 2016. – Режим доступу до ресурсу: <http://www.dsns.gov.ua>.
3. Матеріали Національної акціонерної компанії “Нафтогаз України” до Національної доповіді “Про стан техногенної та природної безпеки в Україні у 2016 році”.
4. List of pipeline accidents in the United States in the 21st century [Електронний ресурс] // Wikipedia. – 2017. – Режим доступу до ресурсу: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_pipeline_accidents_in_the_United_States_in_the_21st_century#2005.
5. Papadakis G. A. Review of transmission pipeline accidents involving hazardous substances / G. A. Papadakis. // European Communities. – 1999. – с. 64.
6. Paul W. Parfomak DOT’s Federal Pipeline Safety Program: Background and Key Issues for Congress / Paul W. Parfomak. // Congressional Research Service. – 2016. – с. 32.
7. Smart ‘pigs’ that sniff out trouble down the pipe [Електронний ресурс] // GE Reports. – 2014. – Режим доступу до ресурсу: <https://gereports.ca/smart-pigs-that-sniff-out-trouble-down-the-pipe/#>.
8. A. Pirumov, M. Shevchenko, A. Minakov, S. Minakov, Ye. Chvertko Application of Reverse Magnetization Method of Evaluating Stresses in Welded Structures / Journal of Materials Science and Technology (Bulgaria) 2015, Vol. 23, No. 4, pp. 295–302

Main pipelines are widely used for transporting of liquid products on long distances. Unfortunately pipeline operating is related to a number of factors – technological, technical, subjective – which may cause accidents which, in turn, lead to pollution of wide territories, property damage and even casualties. The paper gives analysis of accidents on main pipelines in Ukraine and USA during the period of 2005 – 2015. It was determined that accidents often appear to be a result of negative processes in pipeline material during the structure operation, such as corrosion, ageing, mechanical loads and overloads, for example due to ground shifting. Also accidents tend to happen on pipelines which were not properly controlled and inspected. In addition, both Ukraine and USA have a number of old pipelines – those which estimated operation time has already finished. As a main conclusion it should be mentioned that up-to-date methods and means of monitoring of technical state of pipelines are essential for development and application.

Key words: main pipeline, accident, accident factor, monitoring of technical state

O. Vovk, Dr. Sc. Sciences., Prof., ORCID 0000-0002-7531-9847
S. Zaychenko, Dr. Sc. Sciences., Prof., ORCID 0000-0002-8446-5408
Ye. Chvertko, Cand.Sc. (Eng.), Assoc. Prof.,
M. Shevchenko, Cand.Sc. (Eng.), Assoc. Prof.,
A. Pirumov, Cand.Sc. (Eng.), Assoc. Prof.,
O. Radetskaya, Msc

ANALYSIS OF ACCIDENTS ON THE MAIN PIPELINES FOR THE PERIOD 2005-2015.

Main pipelines are widely used for transporting of liquid products on long distances. Unfortunately pipeline operating is related to a number of factors – technological, technical, subjective – which may cause accidents which, in turn, lead to pollution of wide territories, property damage and even casualties. The paper gives analysis of accidents on main pipelines in Ukraine and USA during the period of 2005 – 2015. It was determined that accidents often appear to be a result of negative processes in pipeline material during the structure operation, such as corrosion, ageing, mechanical loads and overloads, for example due to ground shifting. Also accidents tend to happen on pipelines which were not properly controlled and inspected. In addition, both Ukraine and USA have a number of old pipelines – those which estimated operation time has already finished. As a main conclusion it should be mentioned that up-to-date methods and means of monitoring of technical state of pipelines are essential for development and application.

Key words: main pipeline, accident, accident factor, monitoring of technical state

References

1. Law of Ukraine “Pipeline Transport” No 192/96 [electronic resource]: adopted by Verhovna Rada of Ukraine on 15.05.1996 with changes from 28.12.2015. – Kyiv. – Reference: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/192/96-вр>.
2. The State Emergency Service of Ukraine [electronic resource]. – 2016. – reference: <http://www.dsns.gov.ua>.
3. Proceedings of the national Stock Company “Naftogaz Ukrayiny” “ About the Situation With Technogenic and Ecological Safety in Ukraine in 2016”
4. List of pipeline accidents in the United States in the 21st century [Електронний ресурс] // Wikipedia. – 2017. – Режим доступу до ресурсу: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_pipeline_accidents_in_the_United_States_in_the_21st_century#2005.
5. Papadakis G. A. Review of transmission pipeline accidents involving hazardous substances / G. A. Papadakis. // European Communities. – 1999. – с. 64.
6. Paul W. Parfomak DOT’s Federal Pipeline Safety Program: Background and Key Issues for Congress / Paul W. Parfomak. // Congressional Research Service. – 2016. – с. 32.
7. Smart ‘pigs’ that sniff out trouble down the pipe [Електронний ресурс] // GE Reports. – 2014. – Режим доступу до ресурсу: <https://gereports.ca/smart-pigs-that-sniff-out-trouble-down-the-pipe/#>.
8. A. Pirumov, M. Shevchenko, A. Minakov, S. Minakov, Ye. Chvertko Application of Reverse Magnetization Method of Evaluating Stresses in Welded Structures / Journal of Materials Science and Technology (Bulgary) 2015, Vol. 23, No. 4, pp. 295–302.

Надійшла 17.05.2017

Received 17.05.2017

CFD - МОДЕЛЮВАННЯ ТЕЧІЇ ВСЕРЕДИНИ ГВИНТОПОДІБНИХ ТРУБ

Представлений аналіз математичних моделей турбулентності для числового моделювання теплообмінних процесів в гвинтоподібних трубах. Запропонована методика числового дослідження теплообміну всередині труб з рівнорозвиненою поверхнею, які виготовлені за технологією, що розроблена в КПІ ім. Ігоря Сікорського. Проведена валідація даної методики для двох типорозмірів гвинтоподібних труб. Виконані числові дослідження впливу геометричних характеристик та кількості заходів гвинтової канавки на процеси теплообміну в діапазоні чисел Рейнольдса від 15000 до 65000. Аналіз отриманих результатів свідчить, що гвинтоподібні труби мають в 1,5-2,6 рази вищу інтенсивність тепловіддачі в порівнянні з гладкими трубами. Вперше визначено вплив кількості заходів гвинтової канавки на інтенсивність теплообміну всередині труби. Результати дослідження можуть бути використані при розробці теплообмінників типу «газ-газ».

Ключові слова: гвинтоподібна труба, рівнорозвинена поверхня, теплообмін, ефективність, інтенсифікація, вимушена конвекція, числове моделювання

Вступ

Одним з методів підвищення ефективності газотурбінних установок (ГТУ) є застосування систем регенерації теплоти викидних газів. При цьому задача забезпечення максимально можливого ступеню регенерації пов'язана зі зменшенням температурних напорів. Тому при використанні теплообмінників в яких теплообмінна поверхня складається з гладких круглих труб виникає проблема з значним збільшенням габаритів, маси та втрат тисків в газоповітряному тракті установки.

Вирішення цих проблем досягається шляхом застосування теплообмінних поверхонь у вигляді гвинтоподібних труб, що мають одночасний значний ступінь розвинення, як внутрішньої, так і зовнішньої поверхонь труби. Такі труби були розроблені та досліджуються спеціалістами КПІ ім. Ігоря Сікорського для теплообмінників типу "газ – газ" [1,2].

Мета та завдання

Робота пов'язана з розробкою методики числового моделювання процесів теплообміну при вимушеній течії теплоносія всередині гвинтоподібних трубах, проведення числових досліджень та аналізу отриманих даних.

Вибір математичної моделі

Як правило, в регенераторах ГТУ реалізується турбулентний режим течії теплоносія. Такий режим є складним для математичного опису, оскільки турбулентні пульсації істотно впливають на перенесення імпульсу тепла та маси, що в свою чергу впливає на розподіл швидкостей, температури по потоку. Тому їх безпосередній розрахунок за допомогою диференційних рівнянь переносу імпульсу теплоти і маси, без застосування моделей турбулентності неможливий навіть при використанні суперкомп'ютерів [3,4].

В даному розділі статті розглядається проблема з вибору математичної моделі для комп'ютерного моделювання процесів теплообміну складних закручених течій в гвинтоподібній трубі, що має один чи більше заходів гвинтової канавки.

Математична модель для розрахунку таких течій складається з осереднених по Рейнольдсу рівнянь Нав'є – Стокса, енергії та рівнянь, що встановлюють зв'язок тензора турбулентних напружень з тензором осереднених швидкостей деформації (моделей турбулентності).

Оскільки не існує універсальної моделі для всіх типів інженерних задач, зараз в літературних джерелах представлена велика кількість моделей турбулентності – одно-, дво- та багатопараметричних.

До однопараметричних моделей відносять найпростішу модель Спаларта – Алмареса[5], що складається з системи основних рівнянь та одного додаткового диференційного рівняння. Згідно [6-8] ця модель дає гарні результати для пограничних шарів, що характеризуються додатними градієнтами тиску та ефективно працює для режимів з малими числами Рейнольдса, але не має застосовуватись при розрахунку відривних течій.

До двопараметричних відносять сімейство моделей турбулентності на основі відомої $k - \epsilon$ моделі, що була описана в статті Лаундера Джонса в 1972 році [9], в якій турбулентна в'язкість визначається з додаткових диференціальних рівнянь, що описують процеси переносу кінетичної енергії турбулентних пульсацій k та зміну швидкості дисипації турбулентної енергії ϵ .

На думку автора [10] головна причина недостатньої універсальності двопараметричних моделей турбулентності до розрахунку криволінійних та закручених потоків полягає в припущенні, що турбулентність є ізотропною.

В багатопараметричних моделях турбулентності безпосередньо визначаються з диференціальних рівнянь напруження Рейнольдса. Це дозволяє істотно краще враховувати попередню історію потоку, центробіжні ефекти, кривизну ліній току і т.д. Однак для тривимірної течії необхідно розраховувати шість додаткових рівнянь. Основа таких моделей була закладена в роботах Дж. Роди, П.Я. Чоу, В.І. Давидовим [11–13]. Так як модель не використовує припущення про ізотропність турбулентної в'язкості, то вона є надійною при вивченні процесів в системах зі складною геометрією, а також в процесах, що ускладнені закрученням потоку.

На основі вище зазначеного робимо висновок, що для числового моделювання процесів теплообміну всередині гвинтоподібних труб є сенс використовувати багатопараметричну модель Рейнольдсових напружень.

Розрахункова область

В якості розрахункової області береться об'єм труби (рис.1), що обмежений вхідним та вихідним перетинами та внутрішньою стінкою труби, яка є непроникною. Поверхня труби утворюється поворотом профілю витка та просуванням його вздовж гвинтової лінії – спіраль з кроком t та діаметром $d_{\text{вн}}$.

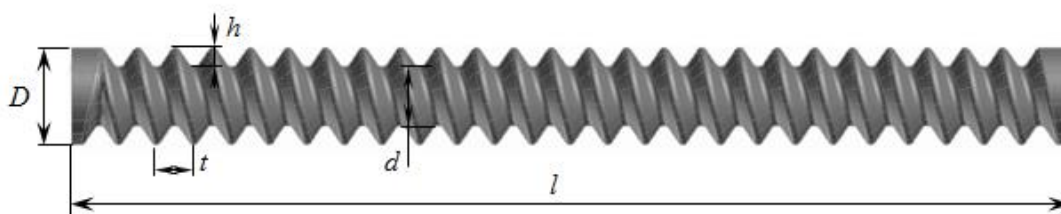
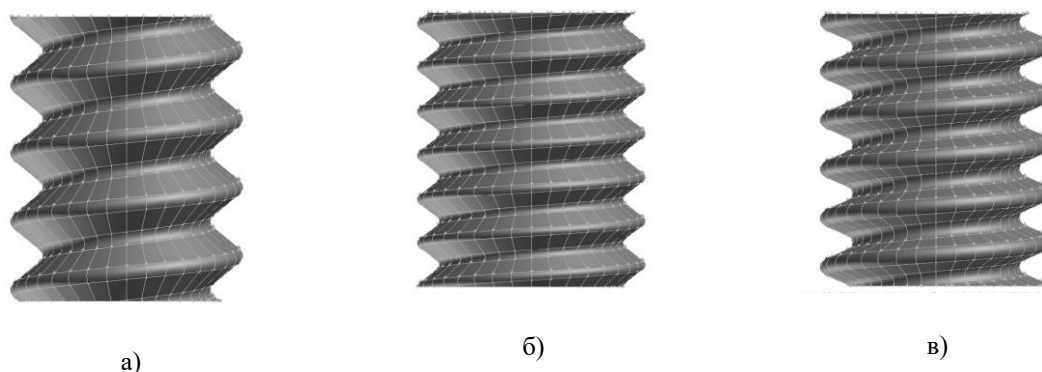


Рисунок 1 – Модель гвинтоподібної труби

Досліджено три типорозміри труб (рис. 2), що відрізнялись геометричними характеристиками профілю витка, та відрізнялись кількістю заходів гвинтової канавки (рис.3). Основні величини геометричних параметрів дослідних моделей труб представлені в табл. 1.



а) 1; б) 2 в) 3

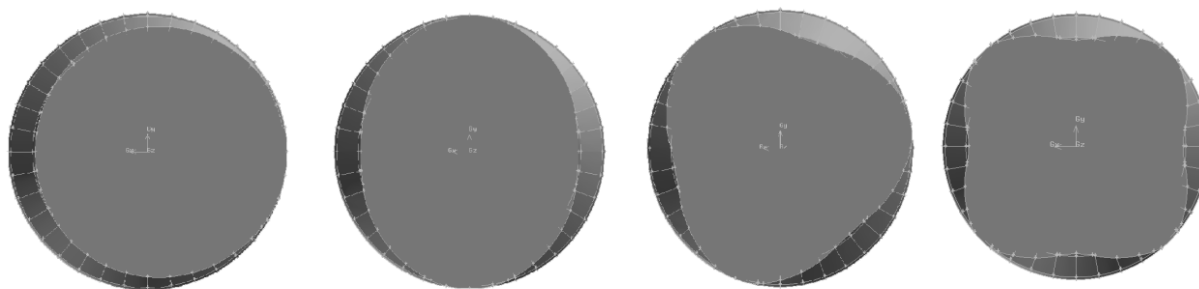
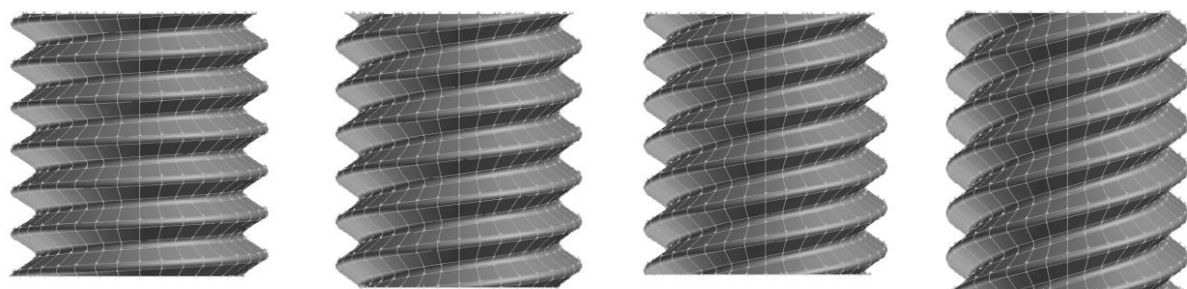
Рисунок 2. – Типорозміри моделей гвинтоподібних труб

Таблиця 1 - Геометричні параметри моделей гвинтоподібних труб

№ труби	Типорозмір	l мм	D мм	d мм	t мм	h мм	t/h	ψ	Z^{**}
1*	1	320	36	26	12	5	2,4	1,163	1
2*	2			30	8	3,5	2,28	1,241	1
3									2
4									3
5									4
6	3			26	9	5	1,8	1,372	1
7									4

* - для гвинтоподібних труб № 1,2 проведені експериментальні дослідження теплообміну

** - кількість заходів гвинтової канавки



а)

б)

в)

г)

а), б), в), г) – одно-, дво-, трьох-, чотирьохзахідна гвинтоподібна труба відповідно
Рисунок 3 - Моделі труб 2 типорозміру з різною кількістю заходів гвинтової канавки. Вид з боку та живий перетин.

Дискретизація розрахункових моделей гвинтоподібних труб

Дискретизація розрахункової області впливає на точність розрахунку вимушеної течії всередині гвинтоподібної труби за допомогою вибраної математичної моделі.

Від параметру y^+ залежить точність розрахунку першого шару чарунок біля стінки обраною математичною моделлю, який впливає на розрахунок всієї області. Тому розбивка геометричної моделі на розрахункову сітку повинна бути такою, щоб $y^+ \leq 1$.

При дискретизації розрахункової області застосовували такі умови:

- сітка була нерівномірна, зі згущенням до поверхні труби (рис.4);
- товщина першого шару дорівнювала 10^{-5} м, вибиралась згідно рекомендації [14];
- товщина кожного з 19 наступних шарів була на 10% більшою ніж попереднього;
- товщина кожного з наступних N-шарів була на 20% більшою ніж попереднього N-1 шару;
- розмір чарунки в поздовжньому напрямку теж змінювався від 0,5 до 3 мм на осі гвинтоподібної труби.

Завдяки такому підходу значення параметра y^+ було в межах від 0,3 до 0,5.

Кількість чарунок для дискретизації геометричних моделей, що досліджуються, складала від 8,8 до 14 млн..

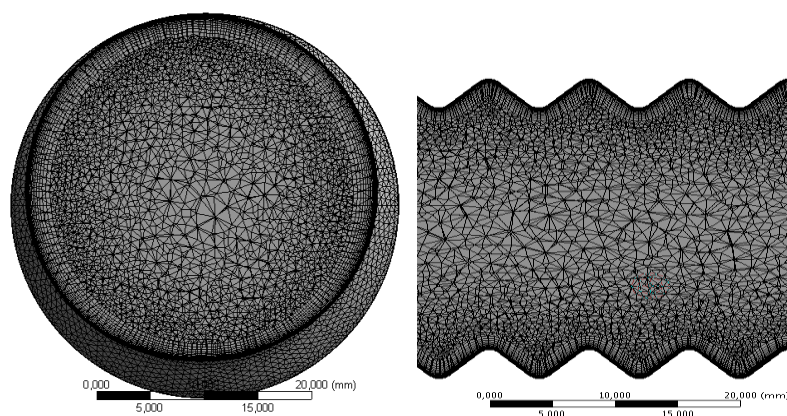


Рисунок 4. – Розрахункова сітка

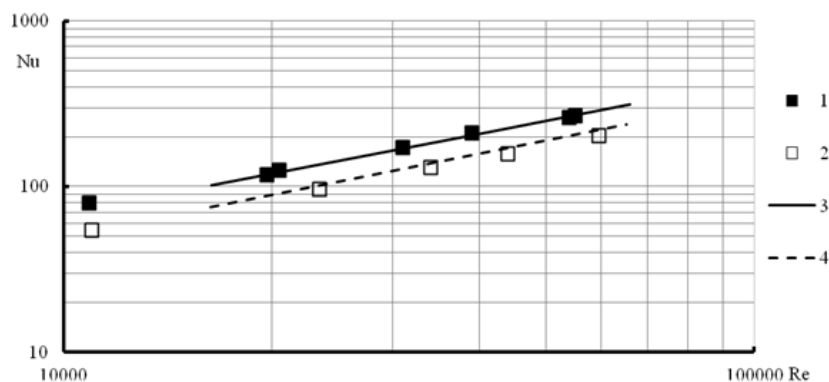
Граничні умови

На межах розрахункової області задавались такі граничні умови:

- вхідний перетин: температура повітря $T' = 293$ К; тиск повітря на вході $P' = P_{\text{атм}}$;
- на стінці труби задавались граничні умови $T_{\text{ст}} = \text{const}$
- вихідний перетин: витрата теплоносія $G = \text{idem}$.

Валідація методики числового моделювання

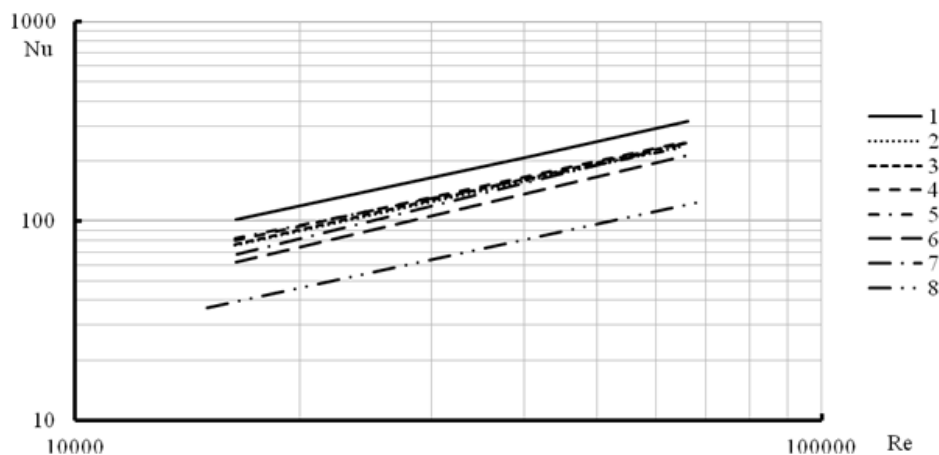
Проведено порівняння даних, що отримані за допомогою методики числового моделювання та даних, що отримані експериментально для поверхонь №1,2 [15] (рис. 5). Відхилення лежать в межах $\pm 5\%$.



1, 2 – гвинтоподібна труба №1,2 відповідно – дослідні дані;
3,4 – гвинтоподібна труба №1,2 відповідно результати числового моделювання
Рисунок 5. - Залежність чисел Нуссельта від чисел Рейнольдса

Результати досліджень

Дослідження конвективного середньоповерхового теплообміну гвинтоподібних труб виконані в діапазоні зміни чисел Рейнольдса $Re=15000 - 65000$. На рисунку 6 в логарифмічних координатах $Nu - Re$ наведені дослідні дані та дані, що розраховані за методикою [16], для гладкої труби.



1..7 – гвинтоподібна труба №1.. 7 відповідно; 8 – гладка труба [16].

Рисунок 6. – Залежність чисел Нуссельта від чисел Рейнольдса

Аналіз отриманих результатів показав, що інтенсивність тепловіддачі для гвинтоподібних труб в 1,5 - 2,6 рази вище ніж для гладкої труби. При цьому максимальний рівень інтенсифікації характерний для гвинтоподібної труби з $t/h = 2,4$ та одним заходом гвинтоподібної канавки. Такий ефект, як показали числові дослідження, можна пояснити складним рухом теплоносія, що супроводжується утворенням інтенсивних вторинних вихрових структур. В результаті, рівень збуреності потоку значно зростає.

При порівнянні результатів дослідження з теплообміну для гвинтоподібних труб виявлено, що найбільш явним фактором, який впливає на інтенсивність теплообміну, є відносний крок гвинтової канавки t/h . При збільшенні величини t/h від 1,8 до 2,4 зростає інтенсивність теплообміну всередині гвинтоподібних труб на 48 – 66 % в залежності від режиму течії.

Аналізуючи вплив кількості заходів гвинтової канавки на інтенсивність теплообміну, отримано, що для гвинтоподібної труби з геометричними характеристиками канавки $t = 9$ мм та $h = 5$ мм при збільшенні заходів гвинтової канавки від 1 до 4 в залежності від режиму течії спостерігається приріст тепловіддачі від 9 до 16%. Однак для гвинтоподібної труби з $t = 8$ мм та $h = 3,5$ мм отримано ефект збільшення інтенсивності тепловіддачі до 8% при збільшенні кількості заходів гвинтової канавки від 1 до 4 тільки для низьких чисел Рейнольдса. Цей ефект можна пояснити зниженням рівня обуреності потоку. При одночасному збільшенні кількості заходів гвинтової канавки та числа Рейнольдса показник степеня в залежності $Nu = Cq \cdot Re^m$ знижується від 0,84 до 0,77.

Зіставлення отриманих результатів з теплообміну для гвинтоподібних труб, що мають однакову глибину канавки $h = 5$ мм, показало вплив кроку між сусідніми канавками на теплообміні процеси всередині таких труб. При збільшенні кроку з $t = 9$ мм до $t = 12$ мм зростає інтенсивність теплообміну на 47 – 66 %.

Висновки

Інтенсивність тепловіддачі всередині гвинтоподібних труб в 1,6-2,6 рази вище ніж для вихідної гладкої труби. Максимальний рівень інтенсифікації характерний для гвинтоподібної труби з відносним кроком гвинтової канавки $t/h = 2,4$.

В подальших дослідженнях гвинтоподібних труб з рівнорозвиненою поверхнею передбачається провести аналіз їх теплоаеродимічної ефективності, оскільки коефіцієнт теплопередачі помітно посилюється ефектом одночасного розвинення внутрішньої та зовнішньої поверхонь труб, яке досягає від 16% до 37%, що відкриває гарні перспективи.

Список використаної літератури

1. Письменный Е. Н., Баранюк А.В., Вознюк М.М. Равноразвитые поверхности теплообмена и методика численных исследований их теплогидравлических характеристик . Промышленная теплотехника. 2012. Т.34, №1. С.45–54.
2. Теплообмінна труба: пат. 67783 Україна. МПК F28F 1/08, F28F 1/42, F28F 13/02. №u201108293.

заявл. 01.07.2011; опубл. 25.07.2012, Бюл. №5. 5с.

3. Бубенчиков А.М., Харламов С.Н. Математические модели неоднородной анизотропной турбулентности во внутренних течениях. Томск.: Томский государственный университет, 2001. 448 с.

4. Харламов С.Н. Алгоритмы при моделировании гидродинамических процессов. Томск.: Изд-во ТПУ, 2008. 80с.

5. Spalart P.R., Allmaras S.R. A one – equation turbulence model for aerodynamic flows. La Recherche Aerospaciale. 1994. No1. P.5–21.

6. Субботина П.Н., Шишаева А.С. Применение различных моделей турбулентности для задач внешнего обтекания в программном комплексе FLOWVISION . URL:http://thesis.com.ru/infocenter/downloads/flowvision/fv_es08_turbul.pdf. (Дата звернення 10.12.2017)

7. Габарук А.В., Стрелец М.Х., Шур М.Л. Моделирование турбулентности в расчетах сложных течений: учебное пособие. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. 88с.

8. Габарук А.В. Современные подходы к моделированию турбулентности: учебное пособие. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. 234с.

9. Jones W.P., Launder B.E. The prediction of laminarization with a two-equation model of turbulence. International Journal of Heat and Mass Transfer. 1972. Vol.15, No2. P. 301-314.

10. Митрофанова О.В. Гидродинамика и теплообмен закрученных потоков в каналах ядерно – энергетических установок. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. 288с.

11. Rotta J.C. Statistische theorie nichthomogener turbulenz. Zeitschrift fur physik. 1951. Vol.129, No5. P.547-572.

12. Chou P.Y. On the velocity correlations and the solution of the equations of turbulent fluctuations. Quarterly Journal of Applied Mathematics. 1945. Vol.3, P.31-38.

13. Давыдов Б.И. К статистической динамике несжимаемой турбулентной жидкости. Доклады академии наук. 1961. Т.136, №1. С.47-50.

14. Быстров Ю.А., Исаев С.А., Кудрявцев Н.А., Леонтьев А.И. Численное моделирование вихревой интенсификации теплообмена в пакетах труб. СПб.: Судостроение, 2005. 389 с.

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

16. Тепловой расчет котельных агрегатов: нормативный метод /под ред. Н.В. Кузнецова. М.: Энергия, 1973. 296 с.

S. Reva, Ph. D. student., **ORCID** 0000-0003-0226-706X

**National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
CFD – SIMULATION OF STREAM IN HELICAL GROOVED TUBES**

Analysis of mathematical models of turbulence for numerical simulation of process of heat exchange in helical grooved tubes is presented. The technique of a numerical research of heat exchange in tubes with a equally developed surfaces made behind technology which is developed in Igor Sikorsky KPI is offered. Validation of this technique for two standard sizes of helical tubes is carried out. Numerical researches of influence of geometrical characteristics and the number of starts of a screw groove on processes of heat exchange within the range of Reynolds numbers from 15000 to 65000. The analysis of numerical data demonstrates that helical tubes have 1,5 - 2,6 times above intensity of heat exchange in comparison with smooth tubes. Influence of number of starts of a screw groove on intensity of heat exchange in a tube is for the first time defined. Results of the research can be used in the development of gas-to-gas heat exchangers.

Keywords: helical tube, equaldeveloped surface, heat transfer, efficiency, intensification, forced convection, numerical simulation.

References

1. E.N. Pis'mennyi, O.V. Baraniuk, M.M. Vozniuk, “Equal developed surfaces of heat exchange and method of numerical researches them heat hydraulic of descriptions,” Industrial heat engineering, vol.34, no1, pp. 45-54, 2012.

2. E.N. Pis'mennyi et al., “Теплообмінна труба [Heat exchange tubes],” UA Patent 67783, July 25, 2012.

3. A.M. Bubenichikov, S.N. Kharlamov, “Matematicheskiye modeli neodnorodnoy anizotropnoy turbulentsnosti vo vnutrennikh techeniyakh [Mathematical models of heterogeneous anisotropic turbulence are in internal flows],” Tomsk: Tomsk State University, 2001. 448p.

4. S.N. Kharlamov, “Algoritmy pri modelirovanii gidrodinamicheskikh protsessov [Algorithms at the design of hydrodynamic processes],” Tomsk: Tomsk Polytechnic University, 2008.

5. P.R. Spalart, S.R. Allmares, "A one – equation turbulence model for aerodynamic flows," La Recherche Aerospatiale, no1, pp.5-21, 1994.
6. P.N. Subbotina, A.S. Shishayeva, "Primeneniye razlichnykh modeley turbulentsi dlya zadach vneshnego obtekaniya v programmnom komplekse FLOWVISION [Application of different models of turbulence for the tasks of the external flowing around in a programmatic complex FLOWVISION]," [Online]. Available: URL:http://tesis.com.ru/infocenter/downloads/flowvision/fv_es08_turbul.pdf.
7. A.V. Gabaruk, M.Kh. Strelets, M.L. Shur, "Modelirovaniye turbulentsi v raschetakh slozhnykh techeniy [A design of turbulence is in the calculations of difficult flows]," St. Petersburg: St.Petersburg Polytechnic University, 2012.
8. A.V. Gabaruk, "Sovremennyye podkhody k modelirovaniyu turbulentsi [Modern approaches to modeling of turbulence]," St. Petersburg: St.Petersburg Polytechnic University, 2016.
9. W.P. Jones, B.E. Launder, "The prediction of laminarization with a two-equation model of turbulence," International Journal of Heat and Mass Transfer, vol.15, no2, pp. 301-314, 1972.
10. O.V. Mitrofanova, "Gidrodinamika i teploobmen zakruchennykh potokov v kanalakh yaderno – energeticheskikh ustanovok [Hydrodynamics and heat transfer of swirling flows in channels of nuclear power plants]," Moscow:FIZMALIT, 2010.
11. J.C. Rotta, "Statistiche theorie nichthomogener turbulenz," Zeitschrift fur physik, vol.129, no5, pp.547-572, 1951.
12. P.Y. Chou, "One the velocity correlations and the solution of the equations of turbulent fluctuations," Quarterly Journal of Applied Mathematics, vol.3, pp.31-38,1945.
13. B.I. Davydov, "K statisticheskoy dinamike neszhimayemoy turbulentsi zhidkosti [To the statistical dynamics of an incompressible turbulent fluid]," Reports of the Academy of Sciences, vol.136, no1, pp.47-50, 1961.
14. Yu.A. Bystrov, S.A. Isayev, N.A. Kudryavtsev, A.I. Leontyev, "Chislennoye modelirovaniye vikhrevoy intensivifikatsii teploobmena v paketakh trub [A numeral design of vertical intensification of heat exchange is in the packages of pipes]," St.Petersburg:Sudostroeniye,2005.
15. L. V. Demchuk et al, "Heat - aerodynamic efficiency of helical tubes with equal developed surface", Eastern – European Journal of Enterprise Technologies, vol. 53, no. 5, pp. 26-30, 2011 (in Ukrainian).
16. N.V. Kuznetsova. "Teplovoy raschet kotel'nih agregatov: normativniy metod [Thermal calculation of boilers: normative method]," Moscow: Energy, 1973.

УДК 536.24:532.517.4

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

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»
CFD – МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ВНУТРИ ВИНТООБРАЗНЫХ ТРУБ

Представлен анализ математических моделей турбулентности для численного моделирования теплообменных процессов в винтообразных трубах. Предложена методика численного исследования теплообмена внутри труб с равноразвитой поверхностью изготовленных за технологией которая разработана в КПИ им. Игоря Сикорского. Проведена валидация данной методики для двух типоразмеров винтообразных труб. Выполнены численные исследования влияния геометрических характеристик и количества заходов винтовой канавки на процессы теплообмена в диапазоне чисел Рейнольдса от 15000 до 65000. Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что винтообразные трубы имеют в 1,5 – 2,6 раза выше интенсивность теплообдачи в сравнении с гладкими трубами. Впервые определено влияние количества заходов винтообразной канавки на интенсивность теплообмена внутри трубы. Результаты исследования могут быть использованы при разработке теплообменников типа «газ – газ»

Ключевые слова: винтообразная труба, равноразвитая поверхность, теплообмен, эффективность, интенсификация, вынужденная конвекция, численное моделирование.

Надійшла 18.12.2017

Received 18.12.2017

Теплообмін шахових пучків гвинтоподібних труб

Засобами CFD-моделювання досліджений конвективний теплообмін шахових пучків гвинтоподібних труб з рівнорозвиненою поверхнею в діапазоні зміни чисел Рейнольдса від $9,5 \cdot 10^3$ до $45 \cdot 10^3$. Вивчені моделі пучків з відношеннями кроків між трубами $s_1/s_2 = 0,46, 0,92$ і $1,83$. Пучки формувались з трьох типів однозахідних гвинтоподібних труб, які відрізнялися кроком гвинтової лінії – $t = 8, 12$ і 20 мм. Зовнішній діаметр труб $D = 16$ мм, глибина виступів-впадин $h = 2,5$ мм і загальна довжина $l = 428$ мм досліджених труб не змінювались. Запропонована залежність для розрахунку конвективних коефіцієнтів тепловіддачі шахових пучків гвинтоподібних труб.

Ключові слова: теплообмін, гвинтоподібна труба, шаховий пучок, розрахункова залежність

Вступ

З метою створення простих і надійних методик теплового розрахунку теплообмінних апаратів типу „газ-газ”, теплообмінна секція яких зібрана з гвинтоподібних труб, необхідно знати і вміти визначити їх теплогідравлічні характеристики.

Матеріал статті присвячений пошуку розрахункових співвідношень для визначення коефіцієнтів тепловіддачі α_2 з боку зовнішнього поперечного омивання пучка повітряним потоком. Метою статті є надання рекомендацій, щодо визначення оптимальних геометричних характеристик пучків гвинтоподібних труб, які є основою для розробки ефективного теплообмінного апарату.

Одними з важливих геометричних параметрів, які впливають на конфігурацію зовнішньої поверхні гвинтоподібної труби є крок t і висота h виступів-впадин гвинтової лінії. Розробка розрахункових співвідношень для визначення коефіцієнтів тепловіддачі α_2 при поперечному омиванні повітряним потоком шахових пучків гвинтоподібних труб виконувалась за допомогою даних теплообміну моделей пучків з кроковими параметрами $s_1/s_2 = 22/48 = 0,46$, $s_1/s_2 = 22/24 = 0,92$, $s_1/s_2 = 44/24 = 1,83$ та кількістю рядів труб поперек та вздовж потоку, відповідно $z_1=10$ та $z_2=9$. Дослідження виконано для трьох типорозмірів гвинтоподібних труб, які відрізняються кроком гвинтової лінії – $t = 8, 12$ і 20 мм, при цьому, висота виступів-впадин гвинтової лінії h не варіювалася і становила $2,5$ мм. Значення вибраних геометричних параметрів для дослідження продиктовано технологічними складнощами виготовлення гвинтоподібної труби, що пов'язані з можливостями нової технології методом трироликового обкочування по зовнішній поверхні труби, розробленою в ММІ КПІ ім. Ігоря Сікорського [1].

Загальний вигляд досліджених гвинтоподібних труб та їх геометричні характеристики наведені на рис. 1 і в табл. 1.

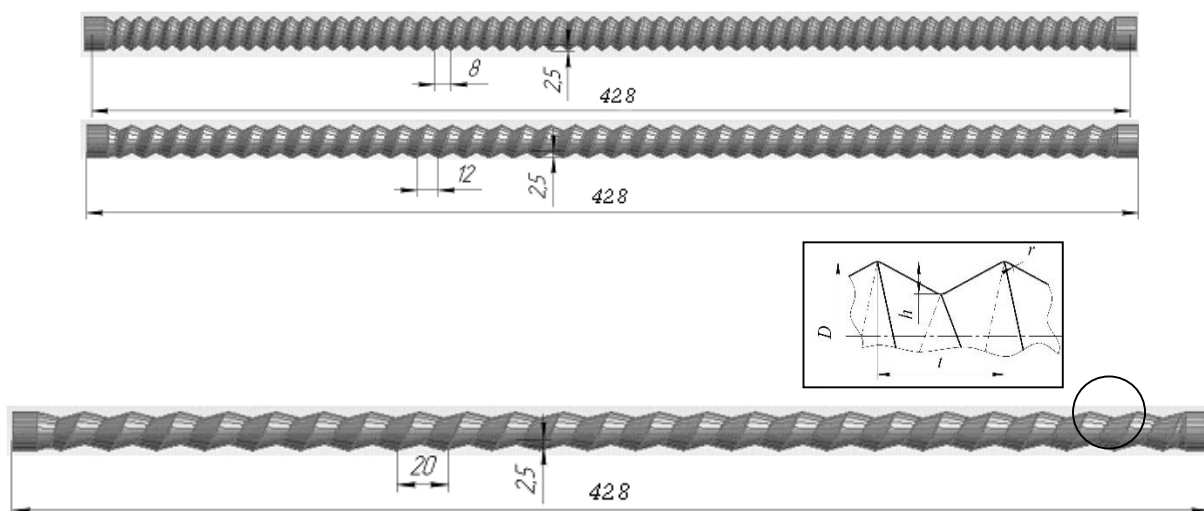


Рисунок 1 – Загальний вигляд та розміри гвинтоподібних труб

Таблиця 1- Геометричні параметри моделей гвинтоподібних труб

№, пов.	l , мм	D , мм	δ , мм	t , мм	h , мм	r , мм	F , м ²	Ψ
1	428	16	1	8	2,5	1,25	$2,56 \cdot 10^{-2}$	1,19
2				12			$2,38 \cdot 10^{-2}$	1,11
3				20			$2,22 \cdot 10^{-2}$	1,03

Методика досліджень

У даній роботі розробка CFD-моделі течії ґрунтується на побудові геометричної моделі розрахункової області та її дискретизації згідно з поняттями про вплив параметрів сітки кінцевих елементів на стійкість і збіжність рішення, завдання граничних умов. Розрахункова область покривається нерівномірною, зі згущенням до стінок труби тетраедричною сіткою. Розмір мінімального кроку у стінці труби вибирається згідно рекомендаціям [2] за умови Re^{-1} . Мінімальний і максимальний кроки при цьому становлять $5 \cdot 10^{-5}$ і $1 \cdot 10^{-4}$ м. Тривимірною розрахункова сітка для випадку омивання потоком зовнішньої поверхні гвинтоподібних труб представлена на рис. 2. Кількість чарунок необхідних для дискретизації потоку в міжтрубному просторі не перевищувало 4 млн. Як свідчить рис. 2, скінченно-елементна сітка міжтрубного простору двохшарова – вона містить пристінну область, яка апроксимується за допомогою елементарних паралелепіпедів і міжтрубну область, яка апроксимується за допомогою тетраедрів. Така побудова розрахункової сітки виконана згідно вимог [2] і забезпечує максимальну вірогідність отриманих результатів з фізичної точки зору.

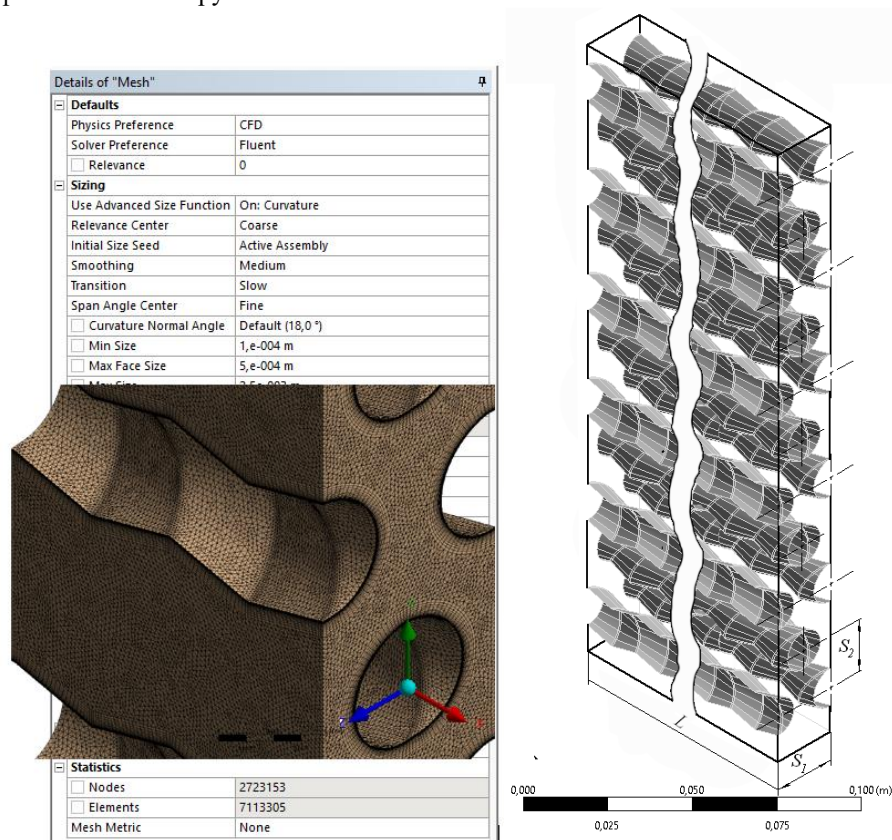


Рисунок 2 – Розрахункова скінченно-елементна сітка моделі пучка гвинтоподібних труб

Обчислення на моделі проводилися при періодичних граничних умовах, які визначались в бічних площинах. Відстань між бічними площинами відповідала поперечному кроку між трубами S_1 (рис.2).

Приведений нижче аналіз виконувався за допомогою розроблених скінченно-елементних CFD-моделей гвинтоподібних труб в середовищі програмного комплексу ANSYS-Fluent. Поставлена задача вирішувалась в стаціонарній постановці з дотриманням вимоги досягнення незалежності рішення від щільності розрахункової сітки. При моделюванні для всіх типорозмірів труб вибирались незмінними наступні граничні умови:

- температура потоку на вході в пучок гвинтоподібних труб $t_{вх} = 26$ °С;
- температура стінки труби $t_{ст} = 100$ °С.

Витрата повітря в представленому обчислювальному експерименті дорівнювала трьом фіксованим значенням $9 \cdot 10^{-4}$, $9 \cdot 10^{-3}$, $3 \cdot 10^{-2}$ кг/с. Теплофізичні властивості повітря задавалися у вигляді поліноміальних функцій температури.

Результати досліджень та їх аналіз

Результати розрахунку пучків гвинтоподібних труб в діапазоні чисел Рейнольдса від $9,5 \cdot 10^3$ до $45 \cdot 10^3$ приведені на рис. 3.

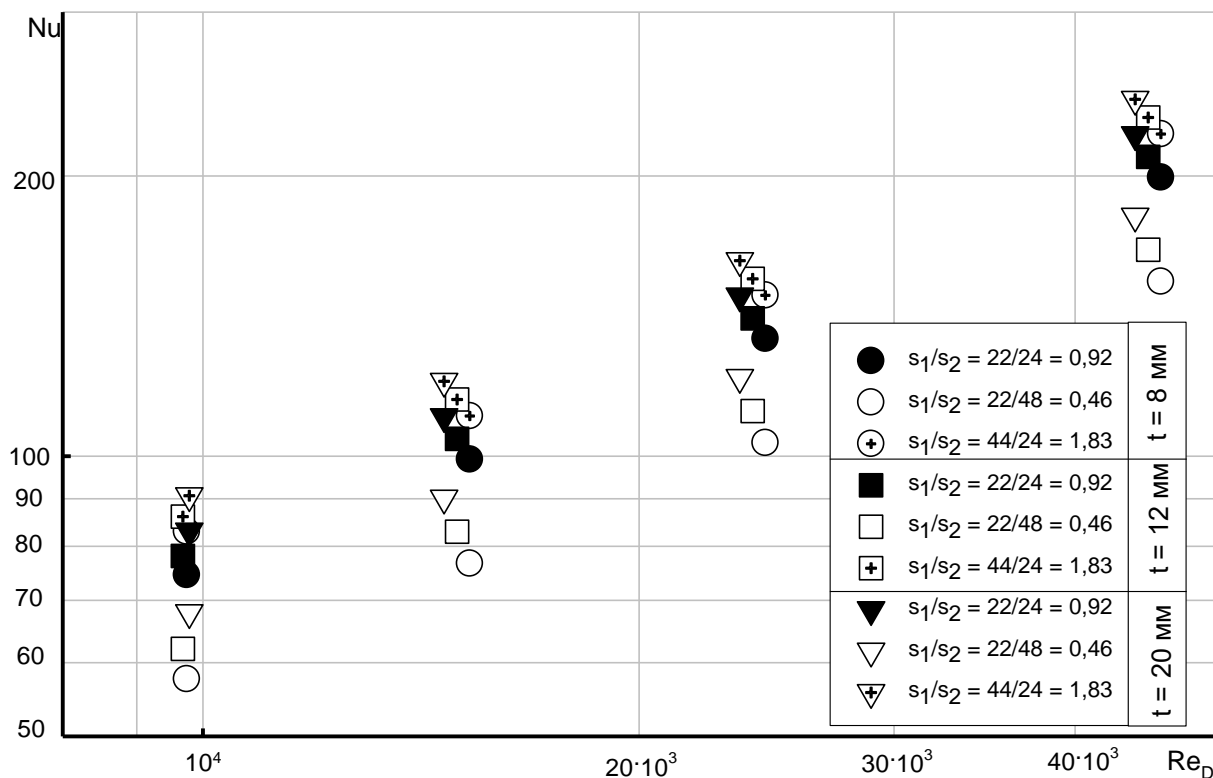


Рисунок 3 – Залежність $Nu = f(Re_D)$ для шахових пучків гвинтоподібних труб

В якості характерних параметрів при обробці результатів експерименту в числах подібності використовувалися: зовнішній діаметр труби D та швидкість в самому вузькому перерізі пучка. Розшаровуючими параметрами отриманих кривих на графіку слугують крок гвинтової лінії t та параметр розміщення труб у пучку s_1/s_2 .

З рис. 3 видно, що розрахункові дані теплообміну в межах пучка з одним і тим же s_1/s_2 залежить від зміни кроку гвинтової лінії t . Так, у пучку з $s_1/s_2 = idem$ при $t = 20$ мм інтенсивність теплообміну більше на (10-15) %, ніж при $t = 8$ мм. Крім того, дані розшаровуються за параметром розміщення s_1/s_2 групами, що складаються з трьох точок. Інтенсивність теплообміну пучка труб з $s_1/s_2 = 1,83$ найвища і знаходиться в діапазоні чисел Нусельта від 90 до 230. Щільний пучок труб з $s_1/s_2 = 0,46$ має найнижчу інтенсивність теплообміну при зміні Nu від 60 до 170. У кожному з пучків інтенсивність теплообміну найвища у труб з кроком гвинтової лінії $t = 20$ мм, а найнижча – у труб з $t = 8$ мм.

Слід відмітити, що теплообмінна поверхня сформована з кроковими характеристиками пучка $s_1/s_2 = 44/24 = 1,83$, хоч і має високу інтенсивність, але площа її поверхні порівняно з іншими найменша, тому для проектування теплообмінного апарату на базі пучка з гвинтоподібних труб доцільно вибрати пучок з $s_1/s_2 = 22/24 = 0,92$, який за теплопередаючими характеристиками практично не відрізняється від попереднього, зате габарити в нього приблизно вдвічі менше.

Числові дані дослідження можна описати степеневою залежністю виду $Nu_k = C_q Re^m$, яка широко застосовується для пучків оребрених труб різної компоновки [3-5] Отримані результати порівнюються з відомими розрахунковими залежностями [6] для визначення інтенсивності теплообміну в гладкотрубних пучках.

Так, в [6] для розрахунку коефіцієнта тепловіддачі конвекцією при поперечному омиванні шахових гладкотрубних пучків газами запропонована залежність

$$Nu_k = 0,36 C_s C_z Re^{0,6} Pr^{0,33}, \tag{1}$$

де C_s – коефіцієнт, що залежить від відносного поперечного кроку $\sigma_1 = s_1/d$ і параметра $\varphi = (\sigma_1 - 1)/(\sigma_2 - 1)$. Значення середнього відносного діагонального кроку труб обчислюється за формулою

$$\sigma'_2 = (0,25 \cdot \sigma_1^2 + \sigma_2^2)^{0,5}. \quad (2)$$

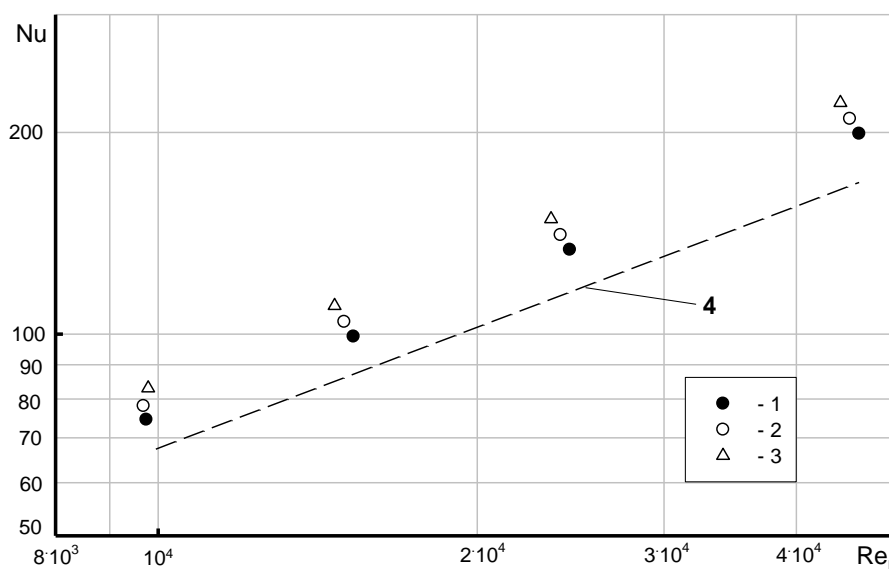
В діапазоні φ від 0,1 до 1,7 коефіцієнт C_s обчислюється за формулою

$$C_s = 0,95\varphi^{0,1}. \quad (3)$$

C_z – поправка на число рядів по ходу газів, при $3,0 < z_2 < 10$ поправка обчислюється за формулою

$$C_z = 3,12z_2^{0,05} - 2,5. \quad (4)$$

На рис. 4 показано порівняння результатів числового дослідження теплообміну пучків гвинтоподібних труб з кроками виступів-впадин $t = 8, 12$ і 20 мм (рис.3) та гладкотрубних пучків труб зовнішнього діаметру $D=16$ мм і з параметром розміщення $s_1/s_2 = 0,92$, що розраховані за системою рівнянь (1) - (4).



1 – гвинтоподібні труби з $t = 8$ мм; 2 – $t = 12$ мм; 3 – $t = 20$ мм; 4 – гладкі труби, формула (1) [6];
Рисунок 4 – Залежність $Nu = f(Re_D)$ для шахових пучків гвинтоподібних і гладких труб з $s_1/s_2 = 0,92$

З аналізу рисунка видно, що інтенсивність теплообміну пучків з гвинтоподібних труб з різними t вище, ніж у гладкотрубних пучках. Так, найбільше перевищення (19-24) % спостерігається у пучках із гвинтоподібних труб з $t = 20$ мм ($t/h = 8$), а найменше (10-16) % у пучках з $t = 8$ мм ($t/h = 3,2$). Відрізняється також і нахил кривих $Nu = f(Re_D)$ гвинтоподібних труб у бік підвищення від нахилу кривої для гладкотрубних пучків, який відповідає степені $m = 0,6$ при числі Рейнольдса у формулі (1). Причому, із зростанням відносного параметру t/h збільшується і значення m . Цей факт вказує на те, що зі зміною умов омивання труби через збільшення кута нахилу гвинтової лінії відносно набігаючого поперечного потоку, зростає турбулентність у приміжевому шарі, яка і призводить до інтенсифікації теплообміну. Вплив на інтенсивність теплообміну кроку t виявлено в роботі [7], де досліджені пучки гвинтоподібних труб з іншими параметрами $t/h, s_1/s_2$ та з більшими значеннями коефіцієнта розвинення поверхні Ψ .

З цього аналізу випливає, що в силу особливостей утворення гвинтоподібної поверхні труби та її конструкції [1], зростання коефіцієнта розвинення поверхні ψ (табл.1), яке відбувається зі зменшенням параметра t/h , не може суттєво впливати на інтенсифікацію теплообміну через недостатнє збільшення зовнішньої площі теплообмінної поверхні. Тому, основною причиною інтенсифікації є зміна гідродинамічних умов омивання, пов'язаних зі зміною геометричної форми гвинтоподібної труби.

Розрахункові формули з теплообміну досліджених пучків гвинтоподібних труб

При створенні розрахункових залежностей з теплообміну для пучка оребрених труб зазвичай використовують параметр розміщення s_1/s_2 та коефіцієнт оребрення труби [5, 8]. Тому, при розробці рівнянь використані підходи та рекомендації зазначених авторів.

Характер впливу на теплообмін параметра розміщення s_1/s_2 спостерігається на рис. 5, де приведені результати теплообміну пучків гвинтоподібних труб для двох межових значень чисел Рейнольдса – $10 \cdot 10^3$ і $45 \cdot 10^3$. Дані рис. 5 з достатньою точністю можна апроксимувати логарифмічною залежністю виду

$$f_1(s_1/s_2) = -a_1 \cdot \ln(s_1/s_2) + b_1, \quad (6)$$

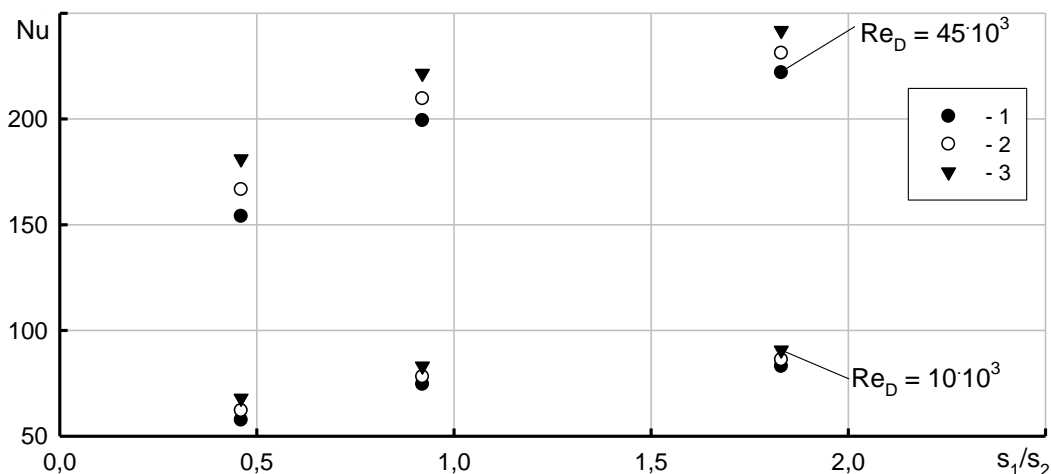
де коефіцієнти a_1 і b_1 слід підібрати таким чином, щоб апроксимуюча залежність максимально була наближена до розрахункової кривої. З урахуванням цих вимог, коефіцієнти a_1 і b_1 відповідно становлять 0,01 і 0,52.

Коефіцієнт розвинення поверхні гвинтоподібної труби Ψ представляє собою відношення повної зовнішньої поверхні гвинтоподібної труби, яка обчислюється за допомогою процедур програмного коду Fluent до повної поверхні гладкої циліндричної труби ($0,0215 \text{ м}^2$) такого ж діаметру D і довжини (табл.1). Залежність чисел Нуссельта від коефіцієнта Ψ для двох межових значень чисел Рейнольдса – $10 \cdot 10^3$ і $45 \cdot 10^3$ приведена на рис. 6.

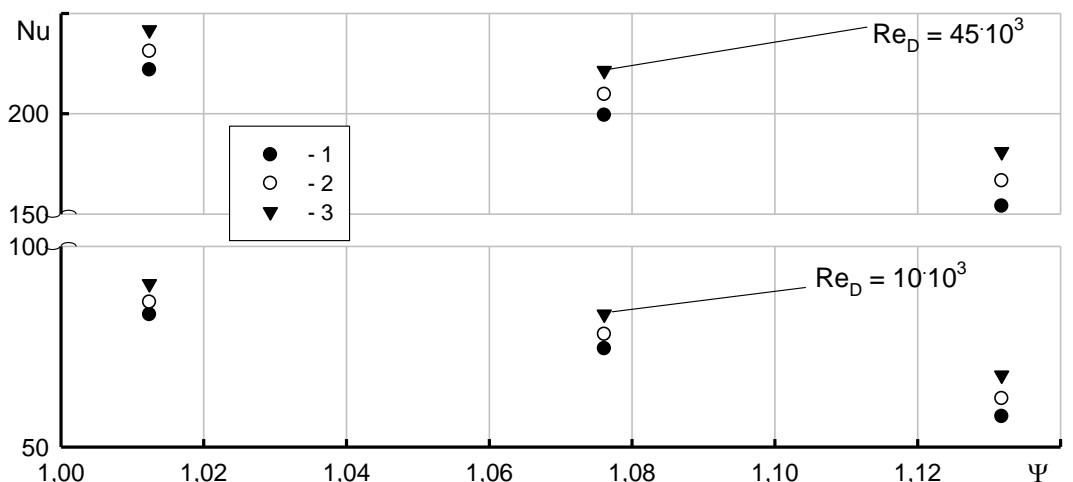
Аналіз даних на рис. 6 свідчить, що найбільш вірогідною кривою для апроксимації залежності теплообміну від коефіцієнта розвинення поверхні є лінійна залежність типу:

$$f_2(\Psi) = -a_2 \cdot \Psi + b_2, \quad (7)$$

Формула (7) має два коефіцієнти a_2 і b_2 , які потрібно підібрати так, щоб крива (7) задовольняла даним з теплообміну всіх досліджених пучків. Величини цих коефіцієнтів становлять відповідно 0,9 і 1,4.



1 – пучок з $s_1/s_2 = 0,46$; 2 – $s_1/s_2 = 0,92$; 3 – $s_1/s_2 = 1,83$;
Рисунок 5 – Залежність $Nu = f(s_1/s_2)$ для пучків гвинтоподібних труб



1 – пучок з $s_1/s_2 = 0,46$; 2 – $s_1/s_2 = 0,92$; 3 – $s_1/s_2 = 1,83$;
Рисунок 6 – Залежність $Nu = f(\Psi)$ для пучків гвинтоподібних труб

Таким чином підсумовуючи, залежність для розрахунку конвективного теплообміну шахових пучків гвинтоподібних труб у яких s_1/s_2 змінюється у межах (0,46 - 1,83), а коефіцієнт розвинення поверхні Ψ лежить в діапазоні (1,0 - 1,13) при зміні чисел Рейнольдса від $10 \cdot 10^3$ до $45 \cdot 10^3$, має вигляд:

$$Nu = (-0,01 \cdot \ln(s_1/s_2) + 0,52) \times (-0,9 \cdot \Psi + 1,4) Re^{0,64} Pr^{0,43}. \quad (8)$$

Похибка між розрахунковими даними CFD-моделювання і визначеними за залежністю (8) не перевищує $\pm 9\%$.

Висновки

Аналіз представлених в статті результатів CFD-моделювання теплообміну шахових пучків гвинтоподібних труб з рівнорозвиненою поверхнею дозволяє зробити наступні висновки:

- застосування таких труб в теплообмінних апаратах є достатньо ефективним засобом інтенсифікації теплообміну порівняно з гладкими круглими трубами;
- причиною інтенсифікації теплообміну є гідродинамічні умови омивання поперечним потоком поверхні гвинтоподібної труби та турбулізація примежового шару, які залежать від геометричного параметру труби t/h ;
- спостерігається тенденція збільшення інтенсивності теплообміну у пучках гвинтоподібних труб при зростанні параметру t/h ;
- остаточно оцінити ефективність теплообмінної поверхні у вигляді шахового пучка гвинтоподібних труб можна після проведення дослідження аеродинамічного опору таких поверхонь.

Список використаної літератури

1. Маковой В.О. Особенности профилирования одно- та трьохзахідних гвинтоподібних труб / В.О. Маковой, П.Ю. Проценко // Вестник Национального технического университета “ХПИ”. – 2013. - №43(1016). – С.153-162.
2. Быстров Ю. А. Численное моделирование вихревой интенсификации теплообмена в пакетах труб / Ю. А. Быстров, С. А. Исаев, Н. А. Кудрявцев, А. И. Леонтьев. – С-Пб.: Судостроение, 2005. – 392 с.
3. Письменный Е.Н. Теплообмен и аэродинамика пакетов поперечно-оребрённых труб / Е.Н. Письменный – Киев: Альтерпрес, 2004. – 244 с.
4. Письменный Е.Н. Расчет конвективных поперечно-оребрённых поверхностей нагрева / Е.Н. Письменный – Киев: Альтерпрес. – 2003. – 184 с.
5. Юдин В.Ф. Теплоотдача и сопротивление шахматных пучков труб с поперечными ребрами при поперечном омывании потоком / В.Ф. Юдин, Л.С. Тохтарова // Теплоэнергетика. – 1973. – № 2. – с.49-52.
6. Тепловой расчет котлов: нормативный метод. Издание 3-е, переработанное и дополненное. Издательство НПО ЦКТИ, СПб. – 1998. – 256 с.
7. Письменный Е.М. Теплообмін пучків труб з рівнорозвиненою поверхнею / Письменный Е.М., Рогачов В.А., Терех О.М., Коньшин В.І., Омельчук Д.С.// Восточно-Европейский журнал передовых технологий. –2013. – № 1/8 (61) – с.29-33.
8. Кунтыш В.Б. Тепловой и аэродинамический расчеты оребренных теплообменников воздушного охлаждения / В.Б. Кунтыш, Н.М. Кузнецов – С-Пб.: Энергоатомиздат. Санкт – Петерб. отд., 1992. – 280 с.

A.Baranyuk, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof.
V. Rogachov, Cand. Sc. (Eng.), Assis. Prof.
N. Andrusik, Msc.

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” HEAT EXCHANGE OF BUNDLES OF SCREW TUBES

With the help of CFD modeling, a study was made of convective heat transfer of chess bundles of helical tubes with an equal surface in the range of variation of Reynolds numbers from $9,5 \cdot 10^3$ to $4,5 \cdot 10^4$. The aim of the research is the development of simple and reliable methods of heat calculation for heat exchangers of the "gas-gas" type, the heat exchange section of which is assembled from screw-like tubes. To achieve the set goal, it is necessary to determine the optimal geometric characteristics of the bundles of helical tubes, namely the step characteristics of the bundles, the tubes in which differ by the pitch of the helical line and the height of the protrusions.

The bundles models with relative steps $s_1 / s_2 = 0,46, 0,92$ and $1,83$ were investigated. All the bundles were formed from three investigated types of helical tubes, which differ in the pitch of the helical line – $t = 8, 12$ and 20 mm. Other geometric parameters, namely the external diameter $D = 16$ mm, the depth of the protrusions of the single-thread helix $h = 2,5$ mm and the total length of the tube $l = 428$ mm, did not change. The values of the selected geometric parameters for the study are dictated by technological difficulties in the manufacture of the screw-like pipe, connected with the possibilities of the new technology by the method of trirolic edging on the outer surface of the pipe, Igor Sikorsky.

Presented in the article the results of the CFD modeling of the heat exchange of chess bundles of spiral-shaped tubes, it is found that the use of such tubes in heat exchangers will be a sufficiently effective means of intensifying heat exchange as compared to smooth round tubes. It is determined that the reason for the intensification of heat exchange is the hydrodynamic conditions for the washing of the surface of the helical pipe by the transverse flow and the turbulence of the boundary layer, which depend on the geometrical parameter of the tube t / h . The authors also proposed dependence for calculating the convective heat transfer coefficients of such bundles.

Keywords: heat exchange, screw-like tube, chess bundles, calculated dependence

References

1. Makovey V.O. Features of profiling of one- and three-western spiral tubes / B.O. Makovey, P.Yu. Prochenko // Announcer of the National technical university of "KHPi". – 2013. - №43(1016). – С.153-162.
2. Bystrov, Yu. A. Numerical simulation of the vortex intensification of heat transfer in stacks of tubes / Yu. A. Bystrov, S. A. Isayev, N. A. Kudryavtsev, A. I. Leont'yev. – St. Petersburg: Sudostroyeniye, 2005. – 392 p.
3. Pis'mennyy Ye.N. Heat exchange and aerodynamics of packages of cross-finned tubes / Ye.N. Pis'mennyy – Kiev: Alterpres, 2004. – 244 p.
4. Pis'mennyy Ye.N. Calculation of convective transversely-finned heating surfaces / Ye.N. Pis'mennyy – Kiev: Alterpres. – 2003. – 184 s.
5. Yudin V.F. Heat transfer and resistance of chess bundles of tubes with transverse ribs with transverse flow washing / V.F. Yudin, L.S. Tokhtarova // Teploenergetika. – 1973. – № 2. – p.49-52.
6. Isachenko V.P. Heat transfer / V.P. Isachenko, V.A. Osipova, A.S. Sukomel - Moscow: Energy, 1975. – 199 p.
7. Bolgarskiy A.V. Termodinamika i teploperedacha. Uchebn. dlya vuzov. Izd. 2-ye, pererab. i dop. / A.V. Bolgarskiy, G.A. Mukhachev, V.K. Shchukin. – M., «Vyssh. shkola», 1975 – 495 s. s il.
8. Thermal calculation of boilers: standard method. Third edition, revised and enlarged. Publishing house of NPO CKTI, St. Petersburg. – 1998. – 256 p.

УДК 621.18.063

А.В. Баранюк, канд. техн. наук, ст. препод.

В.А. Рогачов, канд. техн. наук, доц

Н.Ю. Андрусик,

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»
ТЕПЛООБМЕН ШАХМАТНЫХ ПУЧКОВ ВИНТООБРАЗНЫХ ТРУБ

Средствами CFD-моделирования проведено исследование конвективного теплообмена шахматных пучков винтообразных труб с равноразвитой поверхностью в диапазоне изменения чисел Рейнольдса от $9,5 \cdot 10^3$ до $4,5 \cdot 10^4$. Исследовались модели пучков с относительными шагами $s_1 / s_2 = 0,46, 0,92$ и $1,83$. Все пучки формировались из трех исследованных типов винтообразных труб, которые отличаются шагом винтовой линии – $t = 8, 12$ и 20 мм. Другие геометрические параметры, а именно внешний диаметр $D = 16$ мм, глубина выступов-впадин однозаходной винтовой линии $h = 2,5$ мм и общая длина трубы $l = 428$ мм, не менялись. Предложена зависимость для расчета конвективных коэффициентов теплоотдачи таких пучков.

Ключевые слова: теплообмен, винтообразная труба, шахматный пучок, расчетная зависимость

Надійшла 16.11.2017

Received 16.11.2017

УДК 533.6.08

О.В. Семеняко, асист., ORCID 0000-0002-9097-1358

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

ТЕРМОАНЕМОМЕТРИЧНІ ВИМІРЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕЧІЇ В МІЖРЕБЕРНИХ КАНАЛАХ ПЛОСКО-ОВАЛЬНИХ ТРУБ

Проведені експериментальні термоанемометричні дослідження характеристик течії – осереднених у часі швидкостей та їх середньоквадратичних пульсацій у міжреберних каналах моделі плоско-овальної труби з неповним оребренням при її омиванні потоком повітря. Представлено опис експериментальної установки та методики досліджень. Отримано розподіл полів локальних осереднених у часі швидкостей та середньоквадратичних пульсацій швидкості в центральній площині міжреберного каналу. Проведений аналіз умов інтенсифікації локального теплообміну на поверхнях плоско-овальних труб з неповним оребренням. Виявлено, що течія в міжреберному каналі має складний тривимірний характер. Показано, що за характером течії в міжреберному просторі поверхня ребра може бути уявно розділена по його висоті на дві частини. Виявлено три типи відриву на поверхні ребра – біля гострої вхідної крайки, при взаємодії перехресних потоків та в місцях стикування поверхонь ребра і криволінійної частини труби. Показано, що наявність областей підвищеної інтенсивності локального теплообміну пов'язана з гідродинамічними особливостями течії – генерацією потужного вихорового джгута і його розвитком вздовж прикореневої частини ребра.

Ключові слова: плоско-овальна труба, ребро, канал, течія, термоанемометрія, швидкість, пульсація

Вступ

Важливим напрямом вирішення задач ресурсо- та енергозбереження, пов'язаних зі значним подорожчанням матеріальних та енергетичних ресурсів, є розробка та впровадження нових типів розвинених конвективних поверхонь нагрівання, що відрізняються високою теплоаеродинамічною ефективністю. В зв'язку з цим в „КПІ ім. Ігоря Сікорського” розроблені та впроваджені теплообмінні поверхні у вигляді поперечно-оребrenних труб [1]. Такі труби виготовляються з вуглецевої сталі і представляють собою плоско-овальні труби, що несуть оребрення, до плоских частин котрих методом контактного зварювання приєднані прямокутні ребра (рис. 1). Як показано в [2] плоско-овальні труби з неповним оребренням мають високі теплоаеродинамічні характеристики, які можуть бути порівнянні з характеристиками біметалевих круглоребристих труб з високими коефіцієнтами оребрення.

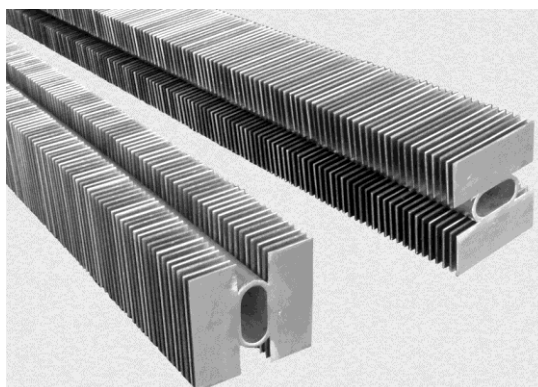


Рисунок 1 – Плоско-овальні труби з неповним поперечним оребренням

Останнім часом в іноземній літературі з'явилися результати досліджень теплообміну та аеродинаміки схожих типів поперечно-оребrenних труб (згідно з термінологією авторів „H-type finned tubes”): круглих [3 - 5] з оребренням пелюсткового типу [6] та овальних [7-8]. Більшість представлених робіт [3 - 5, 7] носять характер констатації значень величин тих або інших параметрів без аналізу впливу на них як геометричних параметрів, так і гідродинамічних особливостей потоку. Крім того, значна кількість робіт виконана із застосуванням методів CFD-моделювання без використання якісних експериментальних

даних. Однак, слід зазначити, що в деяких роботах [5, 7, 8] при проведенні досліджень труб „H-типу” як поверхонь нагрівання енергетичних парових котлів, котрі працюють на кам’яному вугіллі, виявлений ефект самоочищення таких поверхонь від золевих відкладень. Авторами виявлені особливості течії в поверхнях нагрівання, але аналіз її структури і механізму не проведений.

Тому, значний інтерес являє структура течії в каналах утворених теплообмінними поверхнями або їх елементами, яка дозволяє в значній мірі пояснити закономірності їх локального і середньоповерхневого теплообміну, а також згаданого ефекту самоочищення.

Мета та завдання

В роботі [9] при проведенні досліджень теплообміну та аеродинамічного опору шахових і коридорних пакетів плоско-овальних труб з неповним поперечним оребренням виявлено, що найбільш високими теплоаеродинамічними характеристиками володіє труба типу 4 (згідно з позначенням авторів). Представлена робота є певною мірою розвитком досліджень [9]. Тому термоанемометричні дослідження характеристик течії проведені для масштабної моделі (2,5:1) саме такого типу труби (рис. 2). Вибір масштабу моделі обумовлений розмірами датчика термоанемометра.

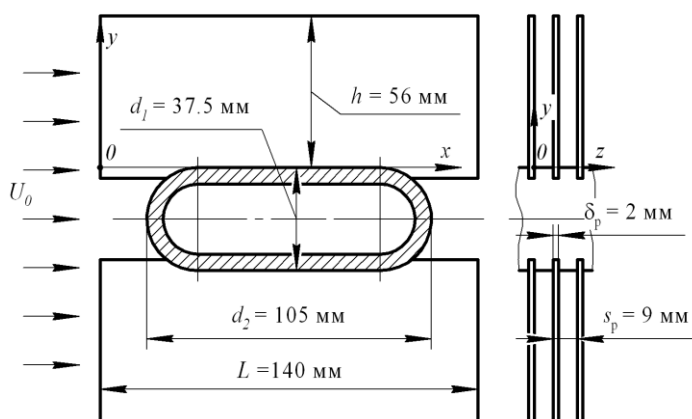
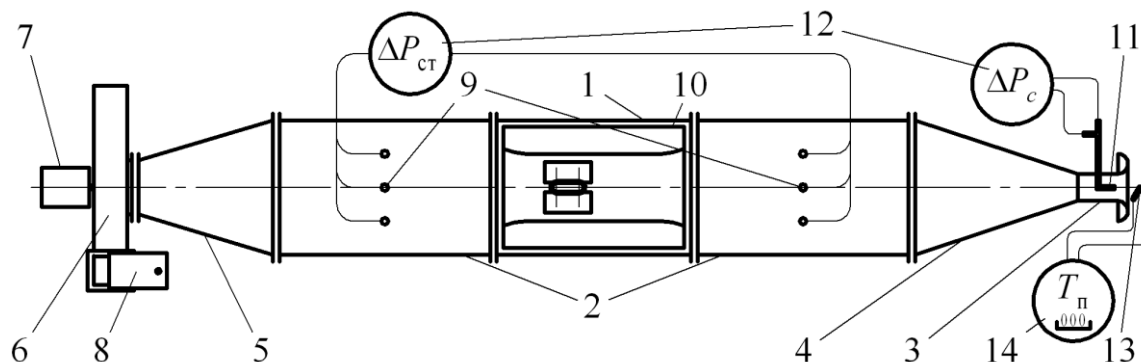


Рисунок 2 – Модель плоско-овальної труби з неповним поперечним оребренням

За мету даної роботи поставлено отримання розподілів локальних характеристик течії (осереднених в часі швидкостей і їх пульсацій) в міжреберних каналах моделі плоско-овальної труби з неповним оребренням при її поперечному омиванні потоком повітря. На основі отриманих полів даних визначити особливості течії та проаналізувати умови інтенсифікації локального і середньоповерхневого теплообміну.

Експериментальна установка та термоанемометричне обладнання

Дослідження проведені на експериментальній установці, що являє собою аеродинамічну трубу розімкнутого типу, прямокутного перетину, розміри якого складали $A \times B = 71 \times 414 \text{ мм}^2$, довжина прямого каналу – 5060 мм (рис. 3).

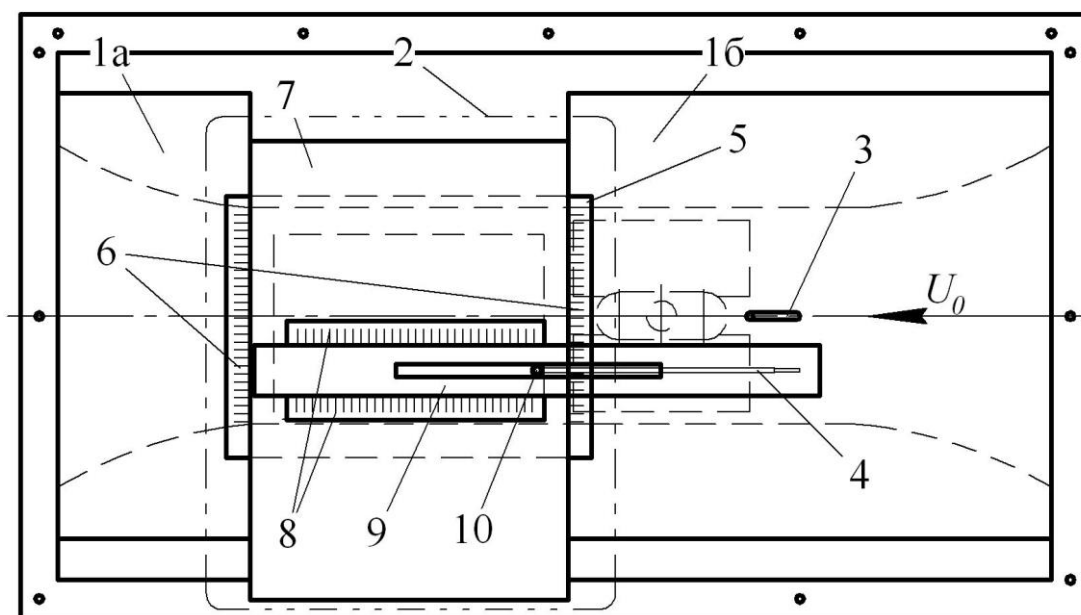


- 1 – робоча ділянка; 2 – заспокійливі ділянки; 3 – вхідне сопло; 4 – дифузор; 5 – конфузор;
 6 – вентилятор; 7 – двигун; 8 – шибер; 9 – відбори статичного тиску; 10 – прижимна рама; 11 – трубка Піто-Прандтля; 12 – мікроманометри; 13 – термопара; 14 – вимірювач сигналів термопар

Рисунок 3 – Експериментальна установка

Проточна частина (прямий канал), яка складалася з робочої ділянки і двох заспокійливих, призначених для формування полів швидкості і вирівнювання статичного тиску, з'єднувалася з вхідним всмоктувальним соплом з діаметром $d_c = 75$ мм через перехідний дифузор. На виході з сопла встановлювалась трубка Піто-Прандтля, за допомогою якої із застосуванням мікроанометру типу ММН-2400 (5) – вимірювався динамічний напір у вихідному перетині сопла. Іншим кінцем проточна частина через перехідний конфузор приєднувалася до всмоктувального патрубку відцентрового вентилятора. Витрати повітря регулювалися шиберам із гвинтовим приводом.

В каналі робочої ділянки довжиною 950 мм до бокових стінок були змонтовані дерев'яні бічні вставки з плавнопрофільованими вхідними та вихідними крайками. Така конструкція дозволяє змінювати ширину поперечного перетину каналу і забезпечує безвідривний плавний вхід у робочу ділянку. При проведенні досліджень ширина робочої ділянки складала $B_p = 170$ мм. Особливість конструкції робочої ділянки (рис. 4) полягала в тому, що верхня трубна дошка була замінена двома кришками з дерев'яноволокнистої плити (1) та системою переміщення координатника датчика (2) (СПКД). При цьому кришка (1а) розміщена вище за потоком дозволяла вводити в дослідний канал трубку Піто-Прандтля (3) для проведення тарування датчика термоанометра. За допомогою СПКД здійснювалось переміщення координатника зі встановленою в ньому державкою датчика термоанометра (4). СПКД забезпечує переміщення координатника як по ширині, так і по довжині каналу. СПКД складається з рами (5), яка прикріплюється до дерев'яних вставок. До рами пригвинчуються прижимні планки зі стандартними лінійками (6), що дозволяє фіксувати переміщення координатника по ширині каналу через 1 мм з точністю 0,5 мм. В зазор між прижимними планками та рамою заводиться алюмінієвий лист (7), що не допускає притоку повітря в робочу ділянку. До листа пригвинчуються прижимні планки (8) для закріплення рейки (9). Прижимні планки являють собою стандартні лінійки, які дозволяють фіксувати переміщення координатника по довжині каналу через 1 мм з точністю 0,5 мм. Рейка здатна переміщуватися вздовж каналу в поздовжньому напрямку. До цієї рейки за допомогою перехідника (10) прикріплюється координатник, який дає можливість переміщувати державку датчика по висоті каналу.



1а, 1б – кришки; 2 – СПКД; 3 – трубка Піто-Прандтля; 4 – державка датчика; 5 – рама СПКД;
6, 8 – прижимні планки; 7 – алюмінієвий лист; 9 – рейка; 10 – перехідник

Рисунок 4 – Схема робочої ділянки

Для проведення градування датчика через отвір в кришці (поз. 1б, рис. 4), в середину каналу робочої ділянки стенду на відстані 95 мм від вхідних крамок вводиться трубка Піто-Прандтля (поз. 3, рис. 4). Для фіксації трубки Піто-Прандтля передбачена притискна планка, яка кріпиться до дерев'яних вставок. Трубка Піто-Прандтля встановлювалась таким чином, щоб її носик знаходився в одному перетині з ниткою датчика.

Під час проведення вимірювань датчик термоанометру, закріплений в державці датчика, переміщувався по висоті h і довжині L ребра (вздовж координат x та y відповідно) по центру міжреберного каналу дослідної моделі.

Нитка датчика розміщувалася перпендикулярно потоку повітря, а також перпендикулярно поверхні ребра. Таким чином, нитка реагувала на сумарну збудженість, яка створюється при течії в каналі в поздовжньому та поперечному (нормальному відносно стінки труби, що несе оребрення) напрямках відносно U_0 . Вимірювання проводились в центральній площині міжреберного каналу, оскільки розміри державки не дозволяли наблизитися до стінки ребра ближче, ніж на 2 мм.

Для вимірювання локальних осереднених у часі швидкостей потоку та їх пульсацій використовувався комплект термоанемометричного обладнання фірми DISA-Electronics (Данія) типу 55M [10] спільно з аналогом однопровідного датчика 55P11 DISA [11], виготовленим в ІТТФ НАН України. Чутливим елементом такого датчика є вольфрамова нитка діаметром $d = 5$ мкм і довжиною $l = 1,2$ мм, що вноситься до потоку.

Основою схеми термоанемометра є вимірювальний міст Уїтстона, в одне з плечей якого підключається нитка датчика (рис. 5 а). Взаємодія потоку з чутливим елементом датчика (вольфрамовою ниткою) викликає зміну його температури і, відповідно, електричного опору. Розбаланс, що з'являється в діагоналі мосту посилюється підсилювачем зворотного зв'язку (ПЗЗ) і подається на вершину мосту. При цьому величина струму живлення, що проходить крізь нитку, змінюється таким чином, щоб поновити температуру нитки і її опір, тобто струм мосту (напряга на його вершині) функціонально зв'язані зі швидкістю потоку.

Схема термоанемометричних вимірювань представлена на рис. 5 б. Задана температура нитки підтримується з допомогою керуючого мосту 55M10. Напряга живлення E фіксується вольтметром середніх значень 55D31, що дозволяє визначити середню в часі швидкість потоку u . Пульсація напруги e , пропорційна середньоквадратичній пульсації швидкості u' , фіксується вольтметром середніх значень 55D35. Візуальне спостереження пульсацій швидкості спостерігається на екрані осцилографа С1-70.

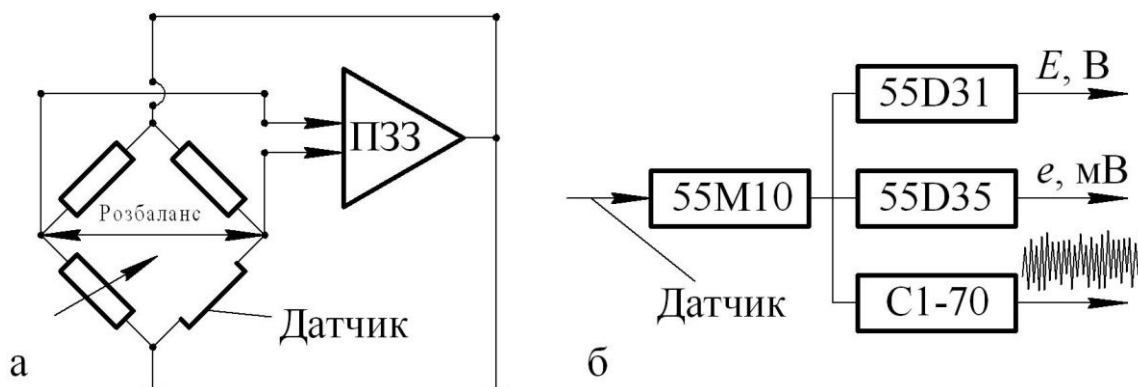


Рисунок 5 – Схема термоанемометру постійної температури (а) та схема термоанемометричних вимірювань (б)

Цифровий вольтметр 55D31 має межі вимірювання напруги 1 В і 100 В. Передня панель містить два перемикачі: напруги на виході з мосту і постійних часу. Перший дозволяє встановити межі напруги: 1, 10, 100 В. Другий дозволяє встановити в діапазоні 0,1 – 100 с 7 значень постійної часу для осереднення сигналу, що знімається з діагоналі мосту і поступає на вхід вольтметру.

Вольтметр середньоквадратичних значень 55D35 дозволяє вимірювати напругу в широкому діапазоні від 1 мВ до 300 мВ. Прилад також забезпечує вимірювання постійних часу пульсуючого сигналу в діапазоні 0,3 – 100 с.

Осцилограф С1-70 дозволяє здійснювати налаштування термоанемометричної системи і візуально спостерігати за сигналом в процесі проведення експерименту.

На підставі отриманої градуювальної характеристики датчика термоанемометра (будувалася в лінеаризованих координатах $E^2 \sim u^{0,45}$ [12]) визначалися константи градуювання E_0^2 і B_0 , необхідні для розрахунку швидкості та її середньоквадратичної пульсації по залежностях (1) і (2) [12]:

$$u = \left(\frac{E^2 - E_0^2}{B_0} \right)^{2,22} \quad (1)$$

де u – швидкість потоку, м/с; E – напряга, що знімається з діагоналі мосту (лінійно пов'язана з падінням напруги на нитці датчика, але посилена за рахунок мостової схеми і підсилювача зворотного

зв'язку), B ; E_0^2 – квадрат фіктивної напруги, значення якого визначається при пролонгації градувальної характеристики до $u = 0$ м/с, B^2 ; B_0 – константа градування, $B^2/(м/с)^{0,45}$;

$$\frac{\sqrt{u'^2}}{u} = \frac{0,444 \cdot E}{E^2 - E_0^2} \sqrt{e'^2} \quad (2)$$

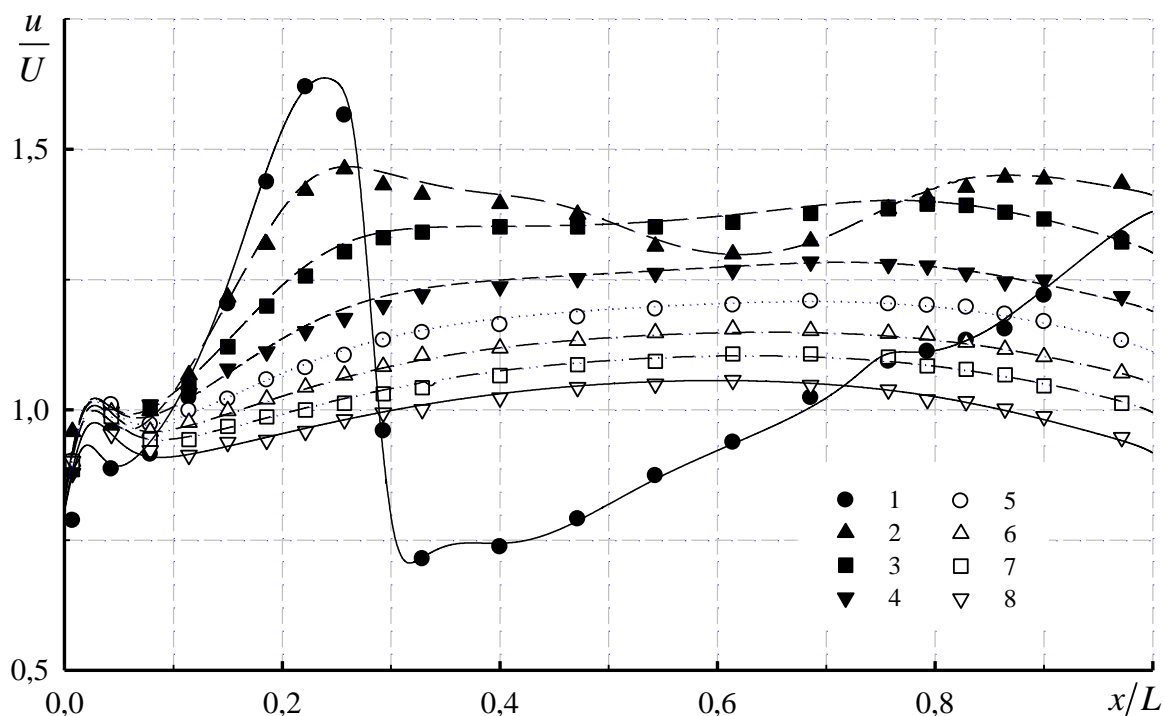
де $\sqrt{e'^2}$ – середньоквадратична пульсація напруги, мВ.

В даній роботі, з огляду на використання однопунктового датчика термоанемометра, схему розташування в міжреберному каналі та прийняту методику вимірювання, середньоквадратична пульсація позадвжньої компоненти швидкості асоціюється зі ступенем турбулентності потоку Tu .

Аналіз величин сумарних розрахункових похибок вимірювання гідродинамічних характеристик потоку (локальних осереднених у часі швидкостей та їх пульсацій) при проведенні термоанемометричних досліджень виконаний за рекомендаціями [13] показав, що похибка вимірювання локальної осередненої у часі швидкості не перевищує $\pm 2,1$ %, а її середньоквадратичної пульсації – $\pm 4,5$ %.

Результати досліджень

Термоанемометричні дослідження характеристик течії – пульсацій швидкості і ступеню турбулентності проведені в ізотермічному ($T \approx 20$ °С) потоці повітря при $Re = Ud_1/\nu \approx 50 \cdot 10^3$, що відповідає швидкості в „живому” перетині робочої ділянки $U \approx 20$ м/с. Розподіли осередненої у часі локальної швидкості потоку в центральній горизонтальній площині міжреберного каналу представлені на рис. 6.



1 – $y/h = 0,054$; 2 – $y/h = 0,13$; 3 – $y/h = 0,25$; 4 – $y/h = 0,38$;
5 – $y/h = 0,5$; 6 – $y/h = 0,63$; 7 – $y/h = 0,75$; 8 – $y/h = 0,88$

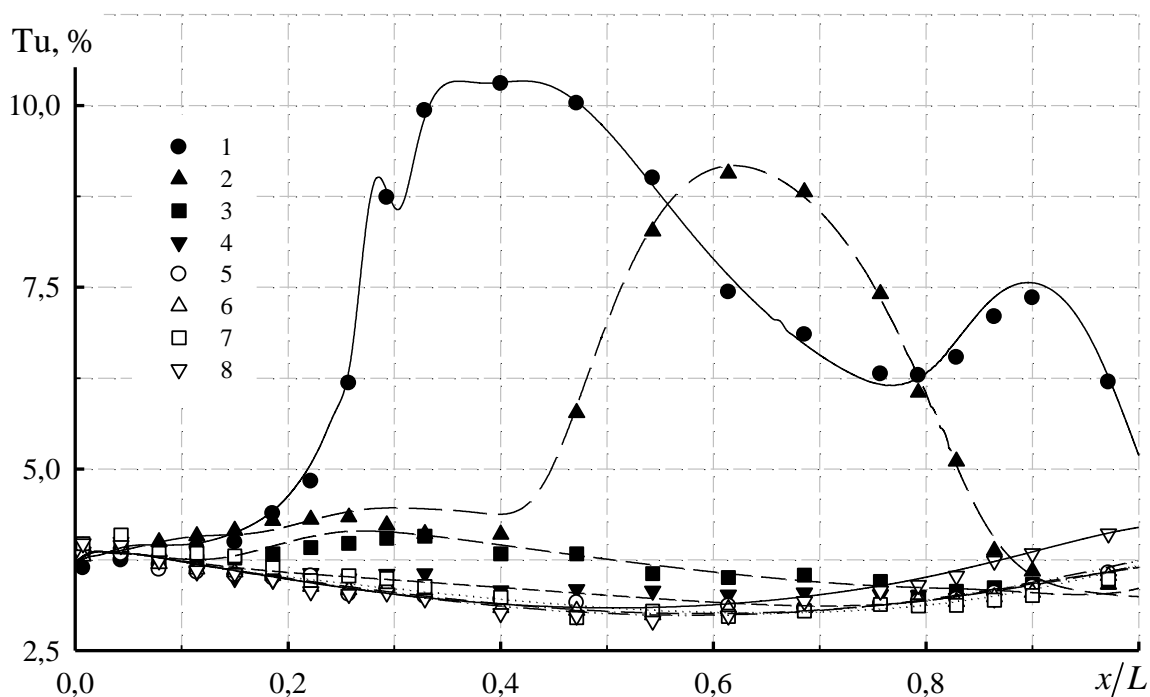
Рисунок 6 – Розподіл швидкості в міжреберному каналі плоско-овальної труби

На рис. 6 видно стрибкоподібне збільшення швидкості біля гострої вхідної крайки ребра (при $x/L < 0,03$) по всій висоті ребра. Після цього відбувається її деяке зниження (приєднання потоку) і подальше нерівномірне по висоті зростання. Поверхню ребра по його висоті можна розділити на дві

приблизно рівні частини – прикореневу $y/h < 0,5$ зі значними градієнтами швидкості і периферійну $y/h \geq 0,5$ з помірними градієнтами швидкості.

Значний градієнт швидкості в області $y/h < 0,2$, $x/L = 0,1..0,25$ пов'язаний з взаємодією потоку, що потрапляє в міжреберний простір з фронту ребра, і потоку, що потрапляє туди з вільного від ребер простору перед лобовою частиною труби, що несе оребрення. Різке падіння швидкості при $x/L = 0,25 - 0,32$ свідчить про відривання потоку від поверхонь ребра і труби з утворенням вихорових структур, що потім переміщуються вниз за потоком тим самим турбулізуючи течію у всій прикореневій області поверхні міжреберного каналу. Все вищесказане можна трактувати як утворення тривимірного вихорового джгута. Це підтверджується рис. 7 на якому представлені розподіли ступеню турбулентності в міжреберному каналі плоско-овальної труби. Крім того на рис. 7 видно збільшення ступеню турбулентності в перетині $y/h = 0,13$ при $x/L = 0,5..0,8$, що свідчить про розвиток вказаних вихорових структур як вниз за потоком, так і вздовж висоти ребра, тобто про їх тривимірність. Стрибок ступеню турбулентності $y/h = 0,054$ при $x/L = 0,85..0,9$ пов'язаний з відриванням потоку від поверхні труби, що несе оребрення в місці з'єднання її кормової частини з ребром.

При збільшенні координати у розподіли швидкості та ступеня турбулентності стають більш рівномірними і в периферійній частині ребра течія має характер подібний до течії в напіввідкритому каналі [14].



1 – $y/h = 0,054$; 2 – $y/h = 0,13$; 3 – $y/h = 0,25$; 4 – $y/h = 0,38$;
5 – $y/h = 0,5$; 6 – $y/h = 0,63$; 7 – $y/h = 0,75$; 8 – $y/h = 0,88$

Рисунок 7 – Розподіл ступеню турбулентності в міжреберному каналі плоско-овальної труби

Вказані особливості потоку в прикореневій частині міжреберного каналу плоско-овальної труби внаслідок підвищених локальних швидкостей призводять до збільшення інтенсивності локального теплообміну. Генерація складних, доволі потужних (рис. 7) вихорових структур призводить до турбулізації потоку в прикореневій частині ребра при $x/L > 0,2$ і тим самим до інтенсифікації теплообміну по всій її поверхні.

Крім того, виявлені закономірності змін характеристик течії пояснюють виявлений авторами [5, 7] ефект самоочищення поверхонь нагрівання з труб з пелюстковим (*H-type*) оребренням.

Висновки

Проведені експериментальні термоанемометричні дослідження гідродинамічних характеристик потоку в міжреберних каналах плоско-овальних труб з неповним поперечним оребренням. Отримані розподіли полів осереднених у часі швидкостей і середньоквадратичних пульсацій швидкості в

центральної площині міжреберного каналу. Аналіз отриманих результатів дозволяє зробити наступні висновки:

- течія в міжреберних каналах носить складний тривимірний відривний характер;
- за характером течії в міжреберному просторі поверхня ребра може бути уявно розділена по його висоті на дві частини;
- генерація підвищеного рівня турбулентності, пов'язана з взаємодією потоку, що потрапляє в міжреберний простір з фронту ребра і потоку, що потрапляє туди з вільного від ребер простору перед лобовою частиною труби, що несе оребрення, призводить до інтенсифікації локального теплообміну в прикореневій області поверхні ребра;
- виявлені закономірності змін характеристик течії в міжреберних каналах плоско-овальних труб дозволяють пояснити ефект самоочищення таких поверхонь нагрівання.

Список використаної літератури

1. Теплообмінна труба: пат. 25025 Україна. МПК (2006) F28F 1/12. №u200702332. заявл. 03.03.2007; опубл. 25.07.2007, Бюл. №11. 2 с.
2. Письменный Е. Н. Новые эффективные развитие поверхности теплообмена для решения задач энерго- и ресурсосбережения. *Пром. теплотехника*. 2007, т. 29, № 5. С. 7 – 16.
3. Zhangjun Wang, Zhuoxiong Zeng, Yihua Xu Study on heat transfer and resistance characteristics of h-type finned tube. *Advanced Materials Research*. 2017. Vol. 805-806. P. 1817 – 1822.
4. Heng Chen, Yungang Wang, Qinxin Zhao, Haidong Ma, Yuxin Li and Zhongya Chen Experimental investigation of heat transfer and pressure drop characteristics of h-type finned tube banks. *Energies*. 2014. Vol 7(11), P. 7094-7104. doi:10.3390/en7117094.
5. Tao Han, Chang'an Wang, Qi Cao, Wufeng Chen, Defu Che Investigation on heat transfer characteristics of the H-type finned tube in flue gas with high content of ash *The 8th International Conference on Applied Energy – ICAE2016: Energy Procedia* 105 (2017). P. 4680 – 4684.
6. Мигай В.К., Быстров П.Г., Федотов В.В. Теплообмен в поперечно-обтекаемых пучках труб с оребрением лепесткового типа. *Тяжелое машиностроение*. 1992. № 7. С. 8 – 10.
7. X.B.Zhao, G.H.Tang, X.W.Ma, Y.Jin, W.Q.Tao Numerical investigation of heat transfer and erosion characteristics for H-type finned oval tube with longitudinal vortex generators and dimples. *Applied Energy*, Vol. 127, P. 93 – 104. 15 August 2014.
8. Lei Ma, Fei Li, Jiayou Liu, Zhimin Li, Fengzhong Sun Experimental research on H-type elliptical finned tubes in low temperature boiler gas flue. doi:10.5023/IJSSST.a.17.09.01.
9. Дослідження процесів теплообміну та аеродинаміки в нових типах оребрених поверхонь для теплообмінних апаратів енергетичного і промислового призначення. Звіт з НДР д/б № 2016-п. ДР № 0107U002087. Кер. Письменний Є. М. НТУУ «КПІ», 2009. 159 с.
10. *DISA scientific research equipment: complete catalog*, Dyva Bogtryk-offset, Denmark, 1972.
11. *DISA: probe catalog*, Dyva Bogtryk-offset, Denmark, 1982.
12. Дыбан Е. П., Эпик Э. Я. Теплообмен и гидродинамика турбулизованных потоков. Киев: Наукова думка, 1985. 293 с.
13. Касандрова О. Н., Лебедев В. В. Обработка результатов наблюдений. Москва: Наука, 1970. 104 с.
14. Баранюк О.В. Теплообмін та аеродинаміка плоских поверхонь з пластинчасто-розрізним оребренням. дис. ... канд. техн. наук : 05.14.06 / НТУУ „КПІ”. Київ, 2009. 183 с.

A. Semenyako, TF, ORCID 0000-0002-9097-1358
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

THERMOANEMOMETRIC MEASUREMENTS OF FLOW CHARACTERISTICS IN INTERFINS CHANNELS OF FLAT-OVAL TUBES

Experimental thermoanemometric research of flow characteristics – time averaged velocities u and its mean square pulsations u' have been carried out in the interfin channels of flat-oval tube with incomplete fins model in transverse flow of air. Description of the experimental equipment and research methodology is presented. The distribution of local time averaged velocity fields and mean square velocity pulsations in the central plane of

the interfin channel are obtained. An analysis of the conditions for the intensification of local heat transfer on the surfaces of flat-oval tubes with incomplete fins is carried out. It was revealed that the flow pattern in the interfin channel has a complex three-dimensional detachment. It is shown that by the flow pattern in the interfin space, the surface of the fin can be imaginary divided by its height into two parts. Three types of separation on the surface of the fins have been identified - near the sharp input edge, at the interaction of cross flows and in places docking surfaces of the fins and the curvilinear part of the tube. It is shown that the generation of an increased level of turbulence associated with the interaction of the flow entering the interfin space from the edge of the fins and the flow entering it from the space free of fins in the frontal part of the tube leads to the intensification of local heat transfer in the root area of the fin. The presence of regions with increased intensity of local heat exchange is associated with the hydrodynamic features of the flow - the generation of a powerful vortex wisp and its development along the root area of the fin. The revealed patterns of changes in flow characteristics in the interfin channels of flat-oval tubes can explain the effect of self-cleaning of such heat transfer surfaces.

Keywords: flat-oval tube, fin, channel, flow, thermoanemometry, velocity, pulsation

References

1. Ye. Pysmennyy *et al.*, "Heat transfer tube", UA Patent 25025, July 25, 2007.
2. Ye. Pysmennyy, "New effective extended heat transfer surfaces for solving energy and resource saving problems", *Industrial heat engineering*, vol. 29, no. 5, pp. 7 – 16, 2007.
3. Zhangjun Wang, Zhuoxiong Zeng, Yihua Xu "Study on heat transfer and resistance characteristics of h-type finned tube", *Advanced Materials Research*, vol. 805-806, pp. 1817 – 1822, 2017.
4. Heng Chen, Yungang Wang, Qinxin Zhao, Haidong Ma, Yuxin Li and Zhongya Chen "Experimental investigation of heat transfer and pressure drop characteristics of h-type finned tube banks", *Energies*, vol. 7(11), pp. 7094-7104, 2014. doi:10.3390/en7117094.
5. Tao Han, Chang'an Wang, Qi Cao, Wufeng Chen, Defu Che Investigation on heat transfer characteristics of the H-type finned tube in flue gas with high content of ash *The 8th International Conference on Applied Energy – ICAE2016: Energy Procedia* 105 (2017). pp. 4680 – 4684.
6. V. Migaj, P. Bystrov, V. Fedotov, "Heat transfer in transversely streamlined tube bundles with petal type fins [Теплообмен в поперечно-обтекаемых пучках труб с ребрением лепестковомго типа]". *Heavy mechanical engineering [Tyazheloe mashinostroenie]*, no. 7, pp. 8 – 10, 1992, [in Russian].
7. X.B.Zhao, G.H.Tang, X.W.Ma, Y.Jin, W.Q.Tao "Numerical investigation of heat transfer and erosion characteristics for H-type finned oval tube with longitudinal vortex generators and dimples", *Applied Energy*, vol. 127, P. 93 – 104, 15 Aug. 2014.
8. Lei Ma, Fei Li, Jiayou Liu, Zhimin Li, Fengzhong Sun "Experimental research on H-type elliptical finned tubes in low temperature boiler gas flue". doi:10.5023/IJSSST.a.17.09.01.
9. Ye. Pysmennyy *et al.*, "The researches of processes of heat transfer and aerodynamics in new types of finning surfaces for heat transfer devices of power and industrial application", NTUU "KPI", Kyiv, Ukraine, Rep. 0107U002087, 2009.
10. *DISA scientific research equipment: complete catalog*, Dyva Bogtryk-offset, Denmark, 1972.
11. *DISA: probe catalog*, Dyva Bogtryk-offset, Denmark, 1982.
12. Ye. Dyban and E. Epik, *Heat transfer and hydrodynamics of turbulized flows*. Kyiv, Ukraine: Naukova dumka, 1985.
13. O. Kasandrova and V. Lebedev, *Processing of observation results*. Moscow, USSR: Nauka, 1970.
14. O. Baranyuk, "Heat Transfer and Aerodynamics of Flat Surfaces with Slit Plate Fins" Ph.D. dissertation, Heat-and-Power Eng. Dept., NTUU "KPI", Kyiv, Ukraine, 2009.

Надійшла 07.12.2017
Received 07.12.2017

ТИРИСТОРНА КОМУТАЦІЯ ТРИФАЗНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ, ЯК ЗАСІБ УНИКНЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ЕКСТРЕМАЛЬНИХ РЕЖИМІВ

В роботі розглянуто проблему, пов'язану із виникнення аперіодичних сплесків струмів при комутації трифазних трансформаторів внаслідок насичення їх магнітопроводів. Представлено можливості уникнення екстремальних струмів в обмотках трансформатора засобами перетворювальної техніки за рахунок синфазного почергового включення ключів тиристорного комутатора і як наслідок, усунення негативних проявів в цілому і на мережу живлення зокрема. Наведено модель системи управління комутацією із автоматичним вибором моментів комутації трансформатора.

Ключові слова: силовий трансформатор, ключ, комутація, крива намагнічування, насичення магнітопроводу, перехідний процес.

Екстремальні перехідні процеси в момент підключення до мережі живлення первинних обмоток трифазних трансформаторів (ТФТ) є достатньо актуальною проблемою [1]. Вони спричиняються насиченням їх магнітопроводів, і, в залежності від типоміналу трансформатора, сплески струму первинної обмотки можуть перевищувати в 5–7 разів її номінальний струм. Часто характер перехідних процесів, пов'язаний із насиченням магнітної системи, ігнорується чи недооцінюється. На практиці, як правило, вибираються необхідні запаси ресурсів комутаційних елементів, обмоток і т. ін. в залежності від струму, що в них протікає, тобто враховується екстремальний характер перехідних процесів за рахунок певних матеріальних затрат. Це не сприяє режиму економії електроенергії, її якості в мережі живлення; при цьому виникають електромеханічні напруження в обмотках, викликані комутаційними струмами, відбувається їх перегрів. Як наслідок, прискорюється старіння ізоляції обмоток, знижується надійність трансформаторів тощо.

Для однофазних трансформаторів такого роду ексцесів можна уникнути, в одному окремому випадку, при нульовому залишковому магнітному потоці осердя ($\Phi_z = 0$), тобто при повному його розмагніченні. В такому разі найбільш сприятливим для включення завжди є момент амплітуди (U_{Im}) синусоїдальної напруги, що прикладається до первинної обмотки трансформатора [2]. При цьому трансформатор відразу виходить на режим усталеного магнітного потоку Φ , тобто його циркуляція буде відбуватися в рамках відрізка кривої намагнічування, для якого характерне велике значення магнітного опору. І навпаки, найбільш несприятливим часом для включення трансформатора є момент переходу напруги мережі живлення через нульове значення.

Для ТФТ, як правило, підкреслюється, що при їх включенні завжди необхідно очікувати сплесків струмів намагнічування, оскільки хоча б в одній із трьох фаз напруга в момент включення буде близькою до нуля [2]. Природно, що такий стан речей не міг бути сприйнятним, що нашло своє відображення при реалізації комутації способом послідовного почергового підключення відповідних фаз [1, 3, 4]. В даному разі осмислення та вирішення проблеми, як правило, знаходиться в руслі застосування програми Matlab/Simulink/SimPowerSystems.

Тут очевидно, що проблема вирішується не в загальному вигляді, а для окремих систем включення обмоток ТФТ та мереж живлення (з нульовим проводом чи без нього і т. ін.), для чисто синусоїдальної форми вхідної напруги, також неочевидним є вплив розгалуженості магнітної системи на комутаційні процеси, який не властивий для однофазних трансформаторів. Тому в проблематику усунення негативних наслідків у комутаційних колах, пов'язаних із насиченням магнітопроводів трансформаторів, необхідно внести елементи ясності і систематики.

Наприклад, при моделюванні включення ТФТ при конфігурації його обмоток Δ/Y імітаційна модель, буде мати вигляд, представлений на рис. 1, тиристорний комутатор буде складатися лише із двох ключів ($K1, K2$), а зображення моделі фактично повторює принципову схему [5]. В ній вмикання ключа $K1$ необхідно виконувати, аналогічно комутації однофазного трансформатора. Це повинен бути момент досягнення амплітуди, проте не фазною напругою $U_1(A)$, а лінійною – $U_1(AB)$. При виборі параметра

блоку Timer1 в тому ж нульовому початковому відліку значення фазового кута для напруги фази “А” необхідно зважувати на те, що точка досягнення абсолютного максимуму $U_{1m}(AB)$ відносно найближчого $U_{1m}(A)$ зміщена на 30° у бік випередження. Сприятливий момент часу вмикання ключа K2 визначається його варіацією відносно параметру блоку Timer1 в сторону збільшення при одночасному відслідковуванні за значеннями струму споживання від мережі живлення Three-Phase Source.

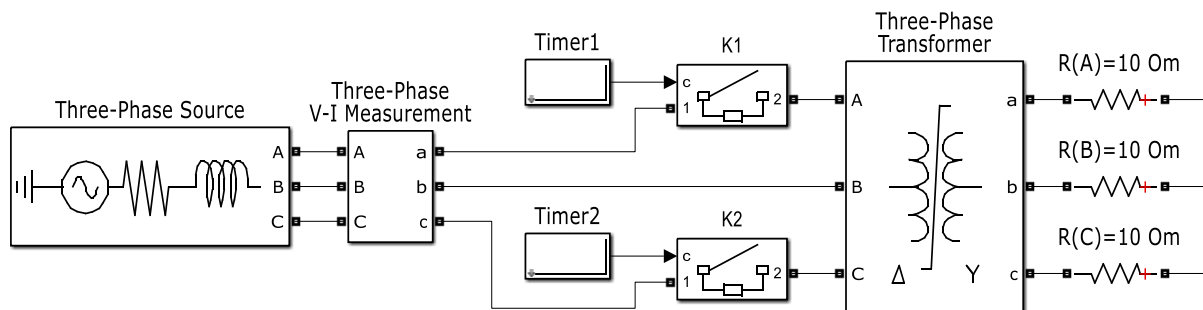


Рисунок 1 – Модель включення ТФТ із конфігурацією обмоток Δ/Y

Очевидно, що одночасне підключення обмоток ТФТ до джерела струму ключами K1, K2 (рис.1) в момент часу досягнення лінійною напругою амплітудного значення – $U_m(AB)$, наприклад, при $t_3 = 23,33$ мс (рис.2, а), спричинить незадовільний результат (рис.2, б). Якщо виконати варіацію моменту вмикання K2 в сторону збільшення, взявши за точку відліку t_3 , то при $t_4 = 28,33$ мс (через проміжок часу, відповідний фазовому куту $\pi/2$), що співпадає із переходом лінійною напругою свого нульового значення, одержимо цілком задовільний результат (рис.2, в). Змінюючи момент вмикання ключа K2 із дискретністю у півперіод відносно t_4 , тобто у кожний наступний перехід $U(AB)$ через нуль, можна впевнитися у задовільному ході комутації. Це видно із рис.2, г, де замикання K2 виконується при $t_5 = 38,33$ мс.

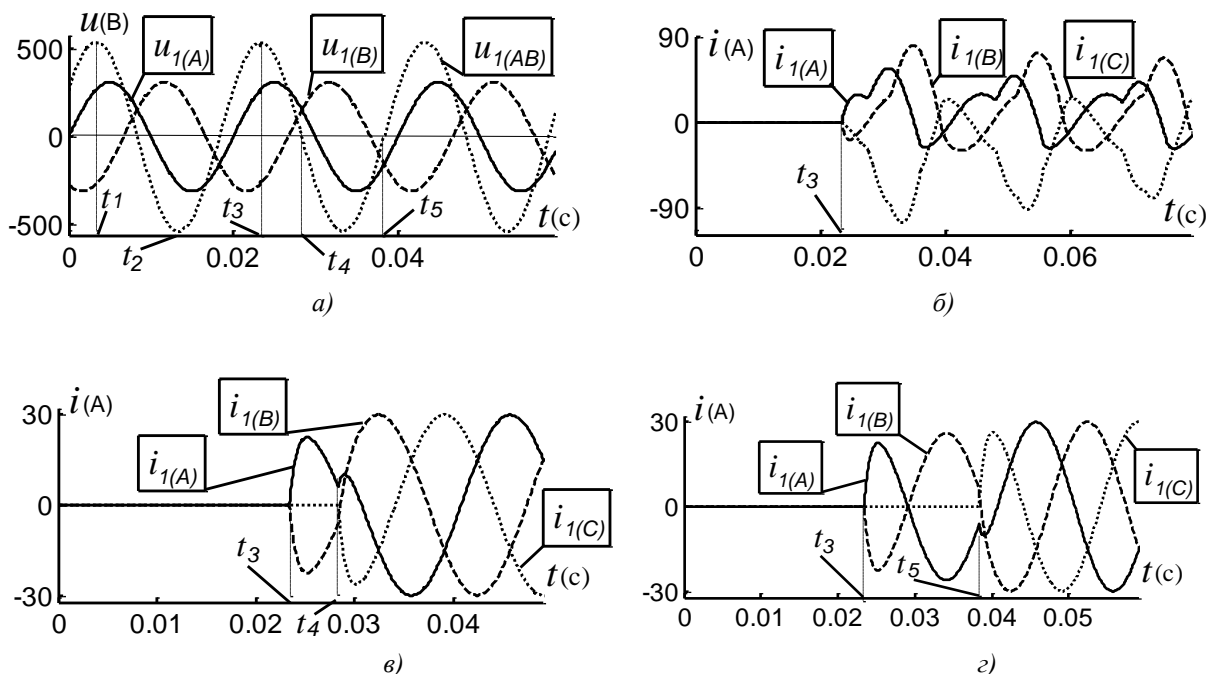


Рисунок 2 – Перехідний процес: при одночасній (а, б) та рознесеній комутації ключів (в, г)

Із співставлення *рис.2, а, в, г* випливає, що **при з'єднанні первинних обмоток ТФТ трикутником комутація першого ключа (підключення двох фаз) повинна виконуватися в максимумі лінійної напруги, що подається першою, а підключення третьої фази – при нульовому значенні тієї самої напруги**. Дане формулювання є варіантом інших [3, 4] і пов'язане із фазовими кутами напруг (рис.2, а) за умов їх відносної стабільності і в якому ніяк не відображено процеси циркуляції потоку в магнітопроводі

та нелінійні властивості останнього. Проте основне, про що, як правило не згадують, це є необхідність нульових початкових умов для магнітопроводу, тобто умова забезпечення нульового значення залишкового магнітного потоку осердя ($\Phi_{\Sigma} = 0$) на момент комутації.

Для інших систем з'єднанням обмоток ТФТ можна виконати аналогічні перебори варіантів комутації ключів (як для К2 - Рис.1) та сформулювати інші подібні алгоритми комутації для даного конкретно вибраного трансформатора за умови дотримання згаданих умов. Проте очевидно, що незважаючи на прямий зв'язок між напругами на обмотках і магнітними потоками: $\Phi = (U_{1m}/w) \int \sin(\omega t - \varphi) dt$, де: w – кількість витків відповідної обмотки, оскільки причина виникнення сплесків струму, подібних до наведених на рис.2, б, є стан магнітної системи, то необхідно оперувати не формою та значеннями напруг прикладених до обмоток, а належними параметрами відповідних потоків.

Для прикладу наведемо характер поведінки потоків при комутації ТФТ із первинними обмотками, включеними “зіркою” із нульовим проводом – Y_n (рис.3), за відсутності сплесків струму намагнічування, тобто випадку задовільного ходу процесів.

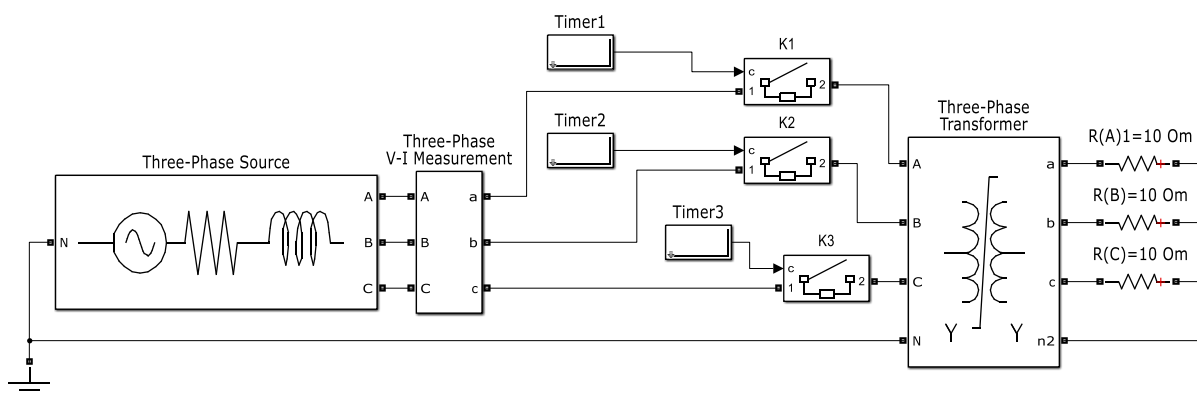


Рисунок 3 – Модель включення ТФТ із конфігурацією обмоток Y_n / Y_n

На рис.4 показано, як змінюються потоки в стрижнях кожної фази трансформатора у відносних величинах, приведених до номінального значення усталеного магнітного потоку. Із рис.3, а, б, в видно, що від моменту комутації фази “А” (t_1) і до часу (t_2) підключення обмотки фази “В” потоки в стрижнях магнітопроводу для всіх трьох фаз співпадають. Це пояснюється тим, що потік функціонально пов'язаний із напругою, а кількість витків всіх обмоток однакова. При цьому стан магнітопроводу визначається лише однією прикладеною фазною напругою $U_1(A)$.

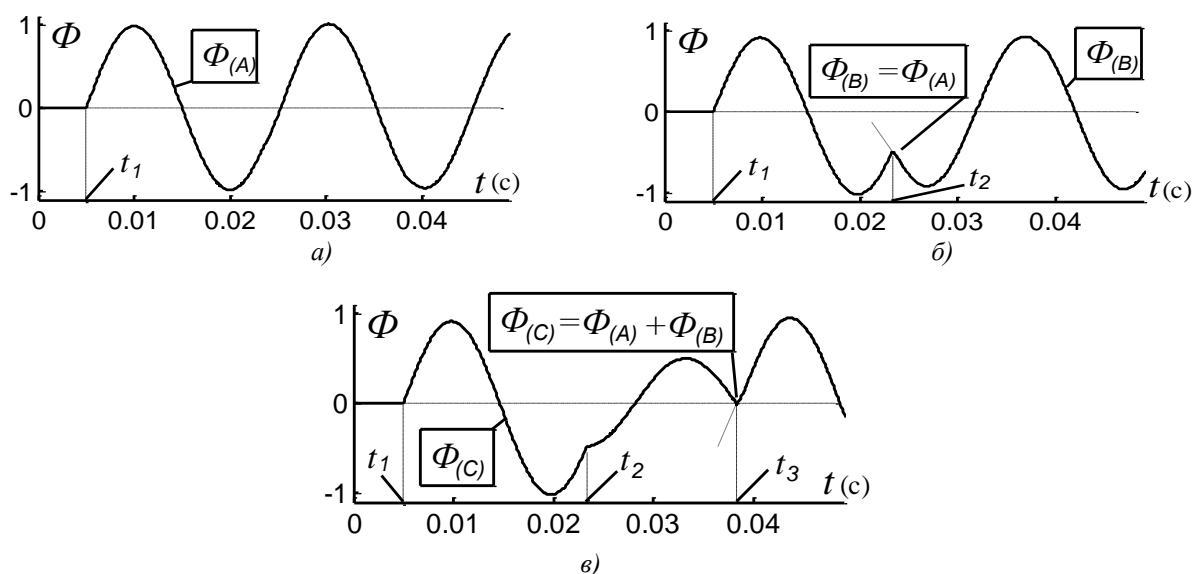


Рисунок 4 – Характер магнітних потоків при включенні ТФТ із системою обмоток Y_n / Y_n

При цьому циркуляція потоку фази "А" – $\Phi(A)$ відбувається в межах $+1 \dots -1$ (рис. 3, а) і не відрізняється за величиною і формою від свого усталеного режиму.

На рис. 4, б показано характер поведінки $\Phi(B)$, у якому можна виділити два інтервали: до моменту комутації фази "В" ($t_1 \dots t_2$), коли потік визначається лише напругою фази "А", і після комутації ($t_2 \dots$), коли його поведінку визначає вже підключена до джерела струму напруга фази "В". Як видно із рис. 4, б, для цього стрижня магнітопроводу точка прийнятної комутації (t_2), припадає на момент зрівняння поточного значення $\Phi(B)$, для якого до моменту t_2 справедливе твердження: $\Phi(B) = \Phi(A)$, із усталеним магнітним потоком $\Phi_y(B)$, значення якого відповідає фазовому куту, співвідносному із t_2 . В такому разі в подальшому (після точки t_2) $\Phi(B)$ ідентично повторюватиме поведінку $\Phi_y(B)$, тобто в стані магнітопроводу не буде причин для виникнення аперіодичних проявів тієї чи іншої форми.

Для стрижня фази "С" хід процесу складніший (рис. 4, в), оскільки в інтервалі часу ($t_2 \dots t_3$), тобто до моменту комутації для цієї фази, $\Phi(C)$ визначається не лише напругою, прикладеною до обмотки фази "А", а і напругою фази "В". Таким чином, $\Phi(C)$ буде являти собою векторну суму $\Phi(A)$ та $\Phi(B)$, завдяки чому його амплітуда зменшиться вдвічі. Із рис. 4, в також випливає, що точка прийнятної комутації (t_3) припадає аналогічно на момент зрівняння поточного магнітного потоку $\Phi(C)$, який в інтервалі $t_1 \dots t_3$, визначався геометричною сумою $\Phi(A) + \Phi(B)$ і на момент комутації став дорівнювати нулю, із його усталеним також нульовим значенням $\Phi_y(C)$. Тобто умови включення фази "С" такі самі, як і для фази "А".

Відхилення від визначених моментів задовільної комутації призводить до перевищення потоком граничних значень усталеного режиму ($+1,0$ та $-1,0$), це в свою чергу веде до сплесків вхідного струму. На рис. 5, а в області графіку штрих-пунктирною лінією показана межа усталеного режиму для від'ємних значень потоку, на якій виділені інтервали її перекриття (1 – 2, 3 – 4, для $\Phi(B)$ та (5 – 6) для $\Phi(C)$. В такому разі вхідні струми обмоток будуть суттєво перевищувати свої номінальні значення (рис. 5, б).

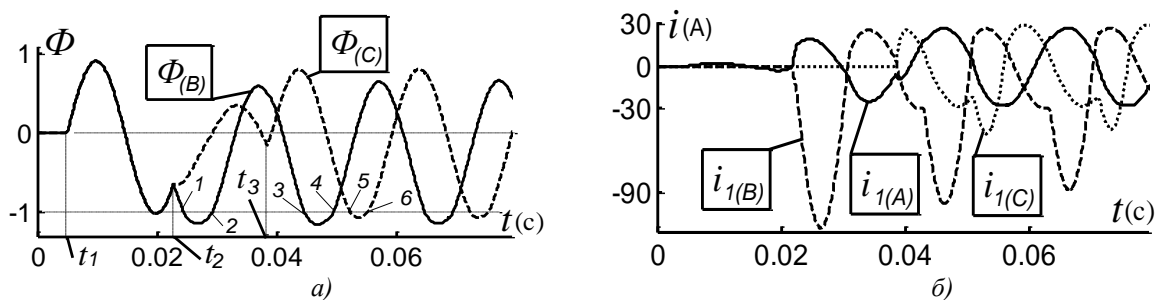


Рис. 5. Характер процесів при незадовільній комутації ТФТ (Y_n / Y_n)

Таким чином, як випливає із рис. 4, в основі умови правильного вибору моментів комутації обмоток ТФТ є порівняння величини поточного магнітного потоку даного стрижня магнітопроводу із його усталеним значенням, властивим уже для післякомутаційного періоду. Цим створюються умови, при яких миттєве значення потоку в процесі комутації завжди буде вписуватися у вказані межі. Може здатися, що ніщо не перешкоджає розрахувати трансформатор із неперервним комутаційним режимом роботи із відповідним запасом по індукції, наприклад подвійним, хоча це буде вимагати відповідних витрат сталі осердя та матеріалу обмоток, але при цьому буде допустимою довільна, а не дискретна, варіація моментів комутації ключа в інтервалі всього півперіоду. Проте це призводить до закінченні комутації ключів до надлишкового магнітного потоку. В подальшому відбуватиметься експоненціальне саморозмагнічування осердя трансформатора, що буде проявлятися аперіодичною складовою в струмах обмоток та напрузі на навантаженні. Стала часу такого процесу досить велика, тому, як правило, в енергетичному плані, цим часто нехтують. Разом із тим, в режимах комутації незначних навантажень, енергії розмагнічування достатньо, щоб підтримувати у відкритому стані тиристор протягом декількох десятих часток секунди, чим погіршуються динамічні властивості системи ключ-трансформатор. Таким чином, довільний вибір одного параметру веде до необхідності збільшення дискретизації в часі і ускладнює реалізацію систем регулювання та організації наступної комутації.

На основі принципу порівняння потоків можливо організувати систему комутації таким чином, що необхідність у приведення магнітного потоку у ТФТ до нульових початкових умов взагалі відпадає. На рис. 6 наведено такого роду модель системи управління комутаціями ТФТ із конфігурацією обмоток Δ/Δ

яка відтворена в середовищі MATLAB/Simulink, та реалізує автоматичний вибір необхідних дискретних часових точок комутації при довільно заданому часі включення відповідного ключа.

Основу моделі, як системи, складає субмодуль Subsystem, в якому порівнюється проінтегрована і відповідним чином промасштабована лінійна напруга $U_1(AB)$ із напругою, пропорційною магнітному потоку $\Phi(A)$, а також виконується також операція порівняння для $U_1(CA)$ та $\Phi(C)$. При моделюванні в даному випадку бажано вибрати алгоритм обчислення “ode23t”.

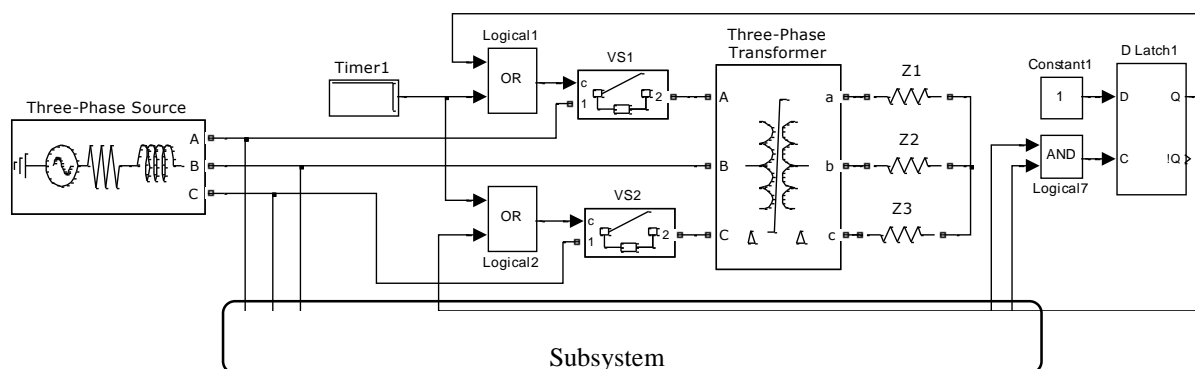


Рисунок 6 – Система комутації із автоматичним вибором моментів включення силових ключів

Висновки

Реалізація такої моделі системи робить зайвим застосування струмообмежувальних компонентів у комутаційних колах і не призводить до втрат енергії при зміні стану трансформатора. За умови виконання принципу порівняння відповідних потоків, комутація ТФТ буде відбуватися завжди так, що перехід від одного стану (відсутності напруги на первинній обмотці) трансформатора до іншого (підключення напруги), не призводить до такої зміни величини потоку, при якій би він міг у подальшому перевищити задані заздалегідь для нього межі. Моделювання проводилося при нульовому запасі по величині індукції магнітопроводу ТФТ, і тому воно гарантовано транспонується на реальні трансформатори, проектування яких передбачає відповідні допуски.

Список використаної літератури

1. Климаш В. С. Способы включения трехфазного электрооборудования и их реализация /В. С. Климаш, В. И. Тараканов //Воронеж: Воронеж. инновац.-технол. центр, Электротехнические комплексы и системы управления, - 2015. – № 2. - С. 24–28. (Сб. науч. трудов).
2. Сергеевков Б. Н. Электрические машины: Трансформаторы / Б. Н. Сергеевков, В. М. Киселев, Н. А. Акимова. – М.: Высшая школа. - 1989. –352с.
3. А. с. 639120 СССР, МПК H02P 13/04. Способ включения трехфазного трансформатора /А. М. Гусев (СССР). – №2529320/24-07; заявл. 12.09.77; опубл. 25.12.1978, Бюл. №47.
4. Патент № 2536304 на полезную модель (Рос. Фед.), МПК B60M 3/00, H02P 13/06. Способ включения трансформатора подстанции /В. С. Климаш, В. И. Тараканов; заявл. 08.05.2013; опубл. 20.12.2014, Бюл. № 35.
5. Халіков В. А. Процеси та організація комутації трифазного трансформатора /В. А. Халіков // Технічна електродинаміка. - 2012. - № 4. - С. 37 - 45.

A. Novosel'tsev, Corresponding member of the NAS of Ukraine,
Institute of Engineering Thermophysics of the NAS of Ukraine
V. Kyryk, Dr. Sc., Professor,

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

EXCLUSION OF EXTREME REGIMES WHEN SWITCHING THREE-PHASE TRANSFORMERS

In this paper, the problem of the occurrence of aperiodic burst of currents during switching of three-phase transformers due to the saturation of their magnetic circuits is considered. The possibilities of avoiding extreme currents in transformer windings with the help of alternating switching of thyristor keys are shown. The

consequence is the elimination of the negative effects of transients in general and energy supply in particular. The model of control system of switching with automatic choice of transformer switching moments, which eliminates the appearance of unwanted transients, is presented.

Keywords: power transformer, key, commutation, magnetization curve, saturation of the magnetic circuit, transient process.

References

1. Klimash V. S. Sposoby vklyucheniya trekhfaznogo elektrooborudovaniya i ikh realizatsiya /V. S. Klimash. V. I. Tarakanov //Voronezh: Voronezh. innovats.-tekhnol. tsentr. Elektrotekhnicheskiye komplekсы i sistemy upravleniya. - 2015. – № 2. - S. 24–28. (Сb. nauch. trudov).
2. Sergeyenkov B. N. Elektricheskiye mashiny: Transformatory / B. N. Sergeyenkov. V. M. Kiselev. N. A. Akimova. – М.: Vysshaya shkola. - 1989. – 352s.
3. А. s. 639120 SSSR. МПК H02P 13/04. Sposob vklyucheniya trekhfaznogo transformatora /A. M. Gusev (CCCR). – №2529320/24-07; zayavl. 12.09.77; opubl. 25.12.1978. Byul. №47.
4. Patent № 2536304 na poleznuyu model (Ros. Fed.). МПК В60М 3/00. H02P 13/06. Sposob vklyucheniya transformatora podstantsii /V. S. Klimash. V. I. Tarakanov; zayavl. 08.05.2013; opubl. 20.12.2014. Byul. № 35.
5. Khalikov V. A. Protsey ta orhanizatsiia komutatsii tryfaznoho transformatora / V. A. Khalikov // Tekhnichna elektrodynamika. □ 2012. □ № 4. □ S. 37-45.

УДК 621.311

А.В. Новосельцев, д-р техн. наук, чл.кор. НАН України,
Інститут технічної теплофізики НАН України,

В.В. Кирик, д-р техн. наук, проф.,

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

ТИРИСТОРНАЯ КОММУТАЦИЯ ТРЕХФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ, КАК СРЕДСТВО ИЗБЕЖАНИЯ ПЕРЕХОДНЫХ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ

В работе рассмотрена проблема возникновения аperiodических всплесков токов при коммутации трехфазных трансформаторов вследствие насыщения их магнитопроводов. Представлены возможности избегания экстремальных токов в обмотках трансформатора средствами преобразовательной техники за счет синфазного поочередного включения ключей тиристорного коммутатора и, как следствие, устранение негативных последствий для устройства в целом и питающей сети в частности.

Ключевые слова: силовой трансформатор, ключ, коммутация, кривая намагничивания, насыщение магнитопровода, переходный процесс.

Надійшла 01.11.2017

Received 01.11.2017

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

В.Г. Смоляр, інженер, ORCID 0000-0002-0355-0353

Д.О. Соколенко, студент

М.В. Назарець, студент

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

ЗАСТОСУВАННЯ СИСТЕМИ КОНДИЦІОНУВАННЯ ПОВІТРЯ ЯК СПОСІБ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТКАЦЬКОГО ВИРОБНИЦТВА, ПОКРАЩЕННЯ УМОВ ПРАЦІ ТА ЗМЕНШЕННЯ ВПЛИВУ НА ДОВКІЛЛЯ

Проблема захисту довкілля від забруднень включає проблему захисту виробничого середовища від шкідливих технологічних викидів. Великого значення набуває дане питання в розробленні нових технологій для покращення якості виробів, зростання екологічної чистоти текстильної продукції, екологічної безпеки виробничого процесу, покращення умов праці та захисту здоров'я працівників.

Ключові слова: текстиль, пиловловлюючі пристрої, кондиціонування повітря, повітрообмін, рециркуляція, зволоження повітря, енергозбереження, ентальпія, охорона праці, охорона довкілля.

Вступ. Ресурсо- і енергозбереження та оздоровлення навколишнього природного середовища – це дві сторони єдиного процесу досягнення еколого-економічної збалансованості у функціонуванні національної економіки. В сучасних умовах значної актуальності набувають питання захисту працівників від шкідливого впливу виробничого середовища, покращення умов праці, зменшення забрудненості довкілля, підвищення ефективності ткацького виробництва. Дотримання гігієнічних вимог до мікроклімату виробничих приміщень дозволяє створювати на робочих місцях здорову, сприятливу для організму людини обстановку, безпечне середовище перебування, за мінімальних витрат на його підтримання [1, 3].

На сьогодні проблеми зниження забрудненості повітря, захисту працівників від небезпечної дії шкідливих речовин та шуму, зменшення впливу на довкілля частково вирішуються застосуванням видалення шкідливих речовин за допомогою вентиляційних систем, удосконаленням технологічного процесу, використанням індивідуальних засобів захисту людини, за допомогою організаційних методів роботи тощо [1,2].

Текстильне виробництво потребує значних витрат енергії та води для свого функціонування. Його характерною особливістю є повсюдне виділення пилу, який утворюється під час переробки та виготовлення текстильних матеріалів і являє собою мікрочастинки волокна. При формуванні синтетичних ниток у повітря також виділяються шкідливі речовини. Через незначну масу вони знаходяться тривалий час у повітрі, в зваженому стані. Супроводжуючи весь технологічний цикл, волокнистий пил заважає нормальному протіканню технологічного процесу, забруднює виробниче середовище і значно впливає на здоров'я працівників, умови та безпеку праці. Як наслідок, знижується продуктивність устаткування і якість продукції, що випускається. Серед апаратників формування капронових ниток захворюваність органів дихання перевищує в 3 рази показники у порівнянні з безпечними умовами праці [3]. Отруйний пил, що видалається, через застосування недостатньо ефективних методів фільтрації також забруднює навколишнє середовище [4]. Досягти значного зниження впливу шкідливих чинників на здоров'я людини, мінімізувати забруднення довкілля, запобігти проникненню шкідливих речовин у повітря робочої зони, з одночасним скороченням витрат енергії та водних ресурсів, підвищити продуктивність ткацького виробництва та якість продукції, що випускається, можливо лише застосуванням комплексного підходу до вирішення існуючих проблем.

Мета та завдання. Метою дослідження є розроблення комплексного підходу до вирішення проблеми зниження забрудненості повітря, захисту працівників ткацького виробництва від небезпечної дії шкідливих речовин та шуму, зменшення впливу на довкілля, на основі застосування автоматизованої системи кондиціонування повітря.

Викладення основного матеріалу дослідження.

Комплексний підхід включає використання сукупності типових методів нормалізації повітряного середовища [3], які базуються на раціональному використанні досконалих виробничих технологій.

Реалізація його можлива із застосуванням автоматизованої системи кондиціонування повітря (СКП) для підтримання заданих температури, вологості, чистоти і швидкості руху повітря, різниці повітря в приміщенні і приточного, зниження рівня шуму, створюваного роботою устаткування СКП.

Для зменшення забрудненості в робочій зоні необхідно застосувати найбільш ефективний спосіб очищення повітря від пилу. Це забезпечить значне покращення умов праці персоналу. При грубому очищенні вловлюється лише крупний пил з розміром порошинок понад 100 мкм. При тонкому очищенні вловлюється найбільш небезпечний дрібний пил з розміром частинок менше 10 мкм. Для вирішення поставленої задачі найбільш доцільним є застосування мокрих пиловловлювачів, у яких частинки змочуються або прилипають до мокрих поверхонь [4,5].

Об'ємні витрати кондиційного повітря для провітрювання приміщення ткацького цеху

$$L_o = L_{p,z} + [3,6Q_{удл} - \rho L_{p,z}(i_{p,z} - i_n)] / \rho K_L (i_{p,z} - i_n), \quad (1)$$

де $L_{p,z}$ – кількість повітря, що видаляється з робочої зони, Для забезпечення підпору в ткацьких цехах $L_{p,z} \leq 0,9 L_o$, м³/год; $Q_{удл}$ – надлишковий тепловий потік повного тепла в приміщенні, Вт; ρ – густина повітря, кг/м³; $i_{p,z}$, i_n – ентальпія повітря, відповідно в робочій зоні, а також, що подається в приміщення, кДж/кг; K_L – розрахунковий або експериментальний коефіцієнт повітрообміну.

Згідно (1) повітряна витрата кондиційного повітря K_L , зменшується зі зростанням коефіцієнту повітрообміну і підвищується з його зменшенням, для вибраного способу організації повітрообміну.

Коефіцієнт повітрообміну

$$K_L = (i_y - i_n) / (i_{p,z} - i_n) = \eta / \alpha, \quad (2)$$

де i_y – ентальпія повітря, що видаляється з цеху; η – коефіцієнт використання приточного повітря; α – коефіцієнт виділення тепла в робочу зону.

В цехах з тепловиділенням коефіцієнт повітрообміну

$$K_L = (t_y - t_n) / (t_{p,z} - t_n), \quad (3)$$

де $t_y, t_n, t_{p,z}$ – температури повітря відповідно: того, що видаляється з цеху, та того, що подається в цех, в робочій зоні, °C.

У СКП (рис. 1) кондиціонування повітря здійснює центральний кондиціонер 1, який подає зовнішнє повітря або суміш зовнішнього і рециркуляційного повітря через канали 2 у верхню зону ткацького цеху 10.

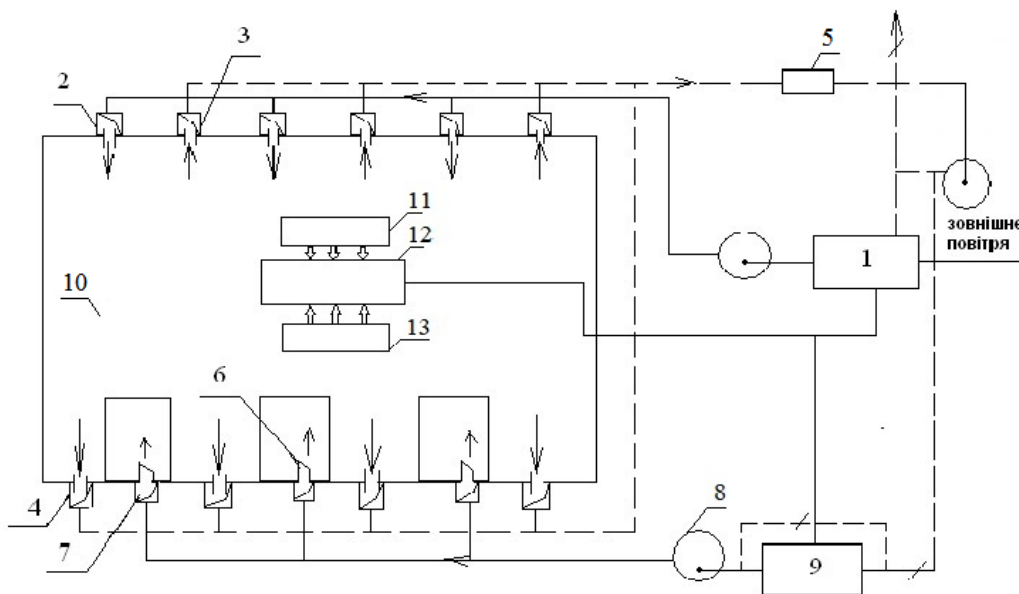


Рисунок 1 – Система кондиціонування повітря ткацького цеху. 1 – центральний кондиціонер; 2,3 – канали у верхній зоні цеху; 4 – канал у нижній зоні цеху; 5 – фільтр; 6 – насадки; 7 – повітропровід; 8 – вентилятор; 9 – камера зрошування; 10 – приміщення ткацького цеху; 11,13 – датчики контролю; 12 – блок керування.

Ефективність пиловловлювання та якості повітря зростає з підвищенням відносної вологості в технологічній зоні ткацького верстату, і в тому числі – при зміні асортименту й лінійної щільності пряжі. Оптимальні параметри повітря в технологічній зоні верстата забезпечуються центральною системою кондиціонування з подачею зволоженого рециркуляційного повітря.

Видалення повітря проводиться з верхньої зони через канали 3, а з нижньої через канали 4. Очищення повітря, що видаляється, від пилу здійснюється за допомогою фільтра 5. Мікроклімат у технологічній зоні верстата досягається шляхом обдування зволоженим рециркуляційним повітрям через розміщені у верстатах насадки 6. Зволожено повітря до насадок подається через повітропровід 7 вентилятором 8. Зволоження рециркуляційного повітря здійснюється в камері зрошування 9 [6,7].

Витрата зволоженого повітря розраховується за формулою:

$$\Sigma G_{ст} = \Sigma(G_{ст}n), \quad (4)$$

де $G_{ст}$ – витрата повітря на верстат, кг/годину; n – кількість верстатів.

Рециркуляційне повітря, проходячи витяжну систему і систему зволоження, нагрівається приблизно на 1,0 кДж/кг.

Регулювання відносної вологості зволоженого рециркуляційного повітря стало можливим завдяки зміні кількості води, що розбризкується в камері зрошування, та залежить від кратності повітрообміну (рис. 2), що є перевагою даної СКП.

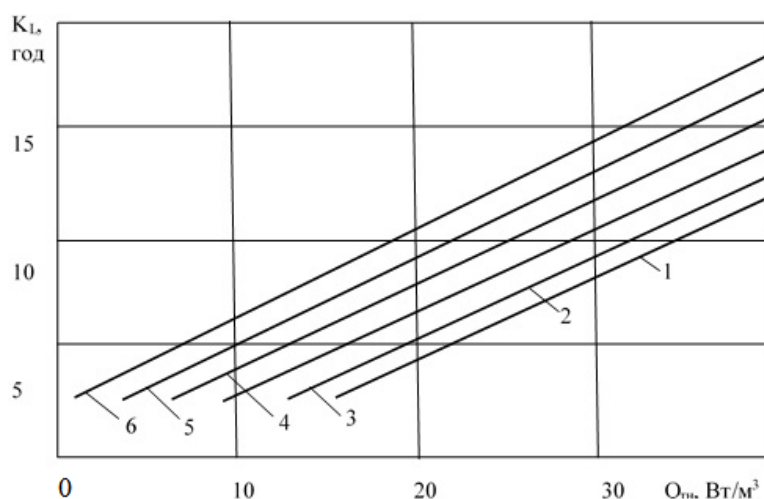


Рисунок 2 – Залежність кратності повітрообміну від теплонапруженості:

1 – кількість зволоженого повітря при $L_{ст} = 0$, 2 – кількість зволоженого повітря при $L_{ст} = 15$ м³/год, 3 – кількість зволоженого повітря при $L_{ст} = 50$ м³/год, 4 – кількість зволоженого повітря при $L_{ст} = 130$ м³/год, 5 – кількість зволоженого повітря при $L_{ст} = 200$ м³/год, 6 – кратність повітрообміну, що не залежить від кількості зволоженого повітря.

Система забезпечує найбільш сприятливі параметри внутрішнього повітря: від центрального кондиціонера – в робочих зонах для комфортного самопочуття обслуговуючого персоналу і в зоні технологічного процесу – від місцевого кондиціонера. Крім того, зменшується потрібна продуктивність центральних кондиціонерів у 2–3 рази, в порівнянні з традиційними центральними СКП [1], що дозволяє скоротити затрати енергії. Витрати приточного повітря в ткацьких цехах для однакових тепловитрат $Q_{надл} = 500$ кВт, $i_{р,з} - i_n = 10$ кДж/кг, $\rho_n = 1,2$ кг/м³. Дані для порівняння наведено в табл.1 у формі показника відносної витрати L_o приточного повітря. Найбільш нераціональне використання приточного повітря простежується у варіанті 1, де від 33 до 66% приточного повітря не використовується. Найбільш ефективним є повітрообмін у десятому варіанті. При цьому можливе суттєве скорочення (до 24%) подачі повітря в робочу зону.

Ресурсо- і енергозбереження та, що змінюються в часі (за певною програмою). Способи організації повітрообміну на текстильних підприємствах характеризуються відносно невеликими значеннями його коефіцієнтів повітрообміну (табл.1).

Таблиця 1 – Коефіцієнти повітрообміну для різних способів провітрювання

№ п/п	Спосіб організації повітрообміну	K_L	L_o
1	Пасивна подача у верхню зону (видалення з нижньої зони розосереджене)	0,6...0,75	1,66...1,33
2	Пасивна подача у верхню зону (видалення з верхньої зони зосереджене)	0,79	1,27
3	Подача через плафони в верхню зону (видалення з верхньої зони розосереджене)	0,8	1,25
4	Пасивна подача у верхню зону (видалення з нижньої зони розосереджене)	0,87	1,06
5	Подача через плафони в верхню зону (видалення з нижньої зони розосереджене)	0,98	1,02
6	Активна подача з верхньої зони в проходи між машинами (видалення з верхньої зони зосереджене)	1,0...1,05	1,0...0,96
7	Активна подача з верхньої зони в проходи між машинами (видалення з верхньої зони зосереджене)	1,1...1,15	0,91...0,88
8	Активна подача з верхньої зони в проходи між машинами (видалення з нижньої зони розосереджене)	1,0...1,3	1,0...0,77
9	Подача в робочу зону затухаючими в ній струменями (видалення з верхньої зони розосереджене)	1,4	0,71
10	Подача в робочу зону повітря системою АСКП	1,5	0,58

Результати досліджень отримані на прикладі ткацького цеху з верстатами АТПР - 120 при подачі зволоженого повітря із розрахунку $L_{ст} = 75...200$ м³/годину на 1 м ширини навою [6]. З рис. 2 видно, що кратність K_p повітрообміну збільшується пропорційно підвищенню теплонапруженості $Q_{тн}$ в цеху. Кратність повітрообміну по повітрю, що видаляється (лінія 6), не залежить від витрати зволоженого повітря, що подається на 1 м навою, але в цілому збільшується приблизно на 3 % в порівнянні з системою кондиціонування без подачі зволоженого циркуляційного повітря. Це пояснюється надмірним теплом, що поступає від вентиляторів витяжної установки системи зволоження. Ефективність очищення повітря від пилу в зоні роботи працюючого персоналу ткацького цеху при залежить від технологічної схеми пиловловлювання та кондиціонування приточного повітря [8,9]. Застосування зволоженого повітря знижує на 30-40 % вміст технологічного пилу в зоні роботи персоналу, підвищує продуктивність, покращує охорону здоров'я та праці, промислову безпеку.

Подальше вдосконалення автоматизованої системи кондиціонування повітря (АСКП) можливе шляхом застосування комп'ютера керування з сервером баз даних, комплекту датчиків та мережевих контролерів, з якими можуть бути пов'язані спеціалізовані виконавчі контролери мережі [1]. На рис.3 наведено графіки залежності ефективності застосування різних систем кондиціонування повітря.

Підвищення ефективності ткацького виробництва, економія енергії найбільша у разі застосування розробленої системи АСКП (крива 3).

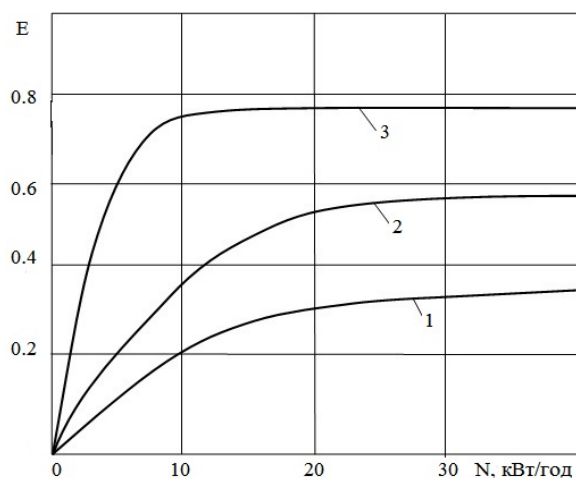


Рисунок 3 – Ефективність застосування систем кондиціонування: 1 – традиційна; 2 – комбінована зі зволоженням повітря; 3 – автоматизована

Екологічний (природоохоронний) ефект енергозбереження обмежується не лише сферою використання енергії. Кожна заощаджена при використанні одиниця палива, гікалорія теплоносія чи заощаджена кіловат-година електроенергії дозволяють також забезпечити значний природоохоронний ефект на всіх попередніх енергетичних стадіях. Заходи з природоохоронної діяльності повинні скоротити обсяги викидів шкідливих речовин в атмосферу, стабілізувати обсяги води, яка використовується на промислові потреби, з одночасним скороченням питомого водоспоживання. Слід враховувати, що ресурсо та енергозбереження можна забезпечити в рамках будь-якої існуючої системи керування технологічним процесом з урахуванням впливу на довкілля.

Основні технічні рішення розробленої АСКП були перевірені в умовах ткацьких підприємств міст Фастова та Броварів. Отримані результати в основному підтвердили правильність теоретичних положень та доцільність застосування АСКП на підприємствах текстильної промисловості.

Висновки

1. Застосування комплексу методів нормалізації повітряного середовища, використання пиловловлювальних пристроїв у поєднанні зі зволоженням повітря дає можливість підтримувати в робочій зоні допустимі мікрокліматичні умови на період восьмигодинної робочої зміни згідно санітарно-гігієнічних норм, а також зменшує забруднення довкілля.

2. Система кондиціонування з подачею зволоженого циркуляційного повітря в технологічну зону забезпечує стабільні оптимальну вологість і температуру, що дозволяє підвищити ефективність роботи обладнання та зменшити виділення пилу. При цьому подачу кондиційного повітря в цех можна зменшити на 20 – 30% у порівнянні з традиційними способами та на 30–40% знизити забруднення повітря в робочій зоні. Поряд з цим зменшується рівень шуму за рахунок підтримання менш напружених режимів роботи вентиляційного устаткування.

3. Застосована технологічна схема з подачею зволоженого циркуляційного повітря та кондиціонування повітря з АСКП на ткацькому підприємстві дозволить підвищити якість продукції, умови роботи персоналу, зменшити забруднення довкілля, а також знизити витрати води та енергоносіїв.

Список використаної літератури

1. Закладний О.М. Системи управління і контролю мікроклімату у виробничих приміщеннях / О.М.Закладний, С.Л.Прядко, В.Г.Смоляр // Збірник матеріалів третьої науково-методичної конференції «Проблеми охорони праці, промислової та цивільної безпеки - К.: НТУУ «КПІ», 2009. С.57–60.

2. Закладний О.М., Використання сучасних систем управління мікрокліматом промислових приміщень – складова підвищення ефективності та безпеки праці / О.М.Закладний, С.Л.Прядко, В.Г.Смоляр // Наукова конференція «Охорона праці та соціальний захист працівників - К.: НТУУ «КПІ», 2008. С.13-15.

3. Ткачук К.Н. Розробка комплексу методів нормалізації повітряного середовища апаратників формування капронових ниток / К.Н.Ткачук, Л.О. Мітюк // Збірник матеріалів третьої науково-методичної конференції «Проблеми охорони праці, промислової та цивільної безпеки» - К.: НТУУ «КПІ», 2009. С.10–11.

4.Звіт по інвентаризації джерел викидів забруднюючих речовин в атмосферу на ВАТ "Чернігівське Хімволокно". - Чернігів, 2001. – 101 с.

5. Сергієнко М.І. Підвищення охорони праці ткацького виробництва за рахунок впровадження нових систем кондиціонування/ М.І.Сергієнко, Є.А. Бахтіна // Збірник наукових праць “Проблеми охорони праці на Україні”. Національний НДІ промислової безпеки та охорони праці. – К.: ННДПБОП. – 2010. –№19. С.48-55.

6. Халезов Л.С. Очистка запыленного воздуха на текстильных предприятиях / Л.С. Халезов., Ю.А. Шиков, А.Г. Чесноков // . - М.: Легкая и пищевая промышленность, 1981. – 136 с.

7. Пирумов А.И. Обеспыливание воздуха / А.И. Пирумов . – М.: Стройиздат, 1981. – 296 с.

8. Коротаев А.М. О снижении запыленности воздуха в ткацком цехе / А.М.Коротаев // Изв.вузов. Технология текстильной промышленности. – 1987. - № 1 - С. 93

9. Нимич Г.В., Михайлов В.А., Бондарь Е.С. Современные системы вентиляции и кондиционирования воздуха.- К.: Тов “Видавничий будинок” Аванпост-Прим.” 2003. – 630 с.

APPLICATION OF AIR CONDITIONING SYSTEM AS A METHOD OF INCREASING THE EFFICIENCY OF TEXTILE PRODUCTION, MANAGEMENT OF WORK CONDITIONS AND STORAGE OF ENVIRONMENTAL IMPACT

The Problem protection of environment from contamination includes and problem of protection of the production ambience from bad technological surge. Special importance gains the question about development new technology, directed on improvement quality product, increasing of the ecological purity to finished products and ecological safety of the production process.

The article deals with the actual issues of preservation of the natural environment and ensuring of the normal working conditions of workers of the enterprises of the textile industry, resource and energy saving in these enterprises, which is achieved by applying an integrated approach with the use of progressive technologies, are the main factors of the process of achieving ecological and economic equilibrium in the functioning of the national economy.

The solution of the problems is possible by applying systems of monitoring and automation of production processes of textile production, and above all - air conditioning, using automated systems. The developed automated air conditioning system at the weaving plant will improve the quality of products, working conditions, reduce environmental pollution, and reduce the consumption of water and energy.

Надійшла 21.11.2017

Received 21.11.2017

УДК 621.3:614.8

Є.А. Бондаренко, д-р техн. наук, доц.

О.Є. Рубаненко, канд. техн. наук, доц.

Н.О. Манжак

Вінницький національний технічний університет

УДОСКОНАЛЕННЯ ПРИНЦИПУ ПОБУДОВИ СУЧАСНОЇ СИСТЕМИ МЕНЕДЖМЕНТУ ЕЛЕКТРОБЕЗПЕКИ НА ЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЯХ, ПІДСТАНЦІЯХ ТА МЕРЕЖАХ НАДВИСОКИХ КЛАСІВ НАПРУГИ

Розглянуто найбільш розповсюджені підходи європейських систем менеджменту різних напрямів діяльності та сфер управління. Розроблено структурну модель системи управління електробезпекою та алгоритм аналізу ризику електротравматизму. Це дозволило запропонувати принцип функціонування системи електробезпеки електротехнічного персоналу, що обслуговує енергетичні установки на станціях, підстанціях та електричних мережах надвисоких класів напруги. Запропонований принцип управління системою електробезпеки від дії електричної енергії оснований на замкненому інформаційному контурі, який містить послідовність логічно пов'язаних функцій управління: оцінювання ризику ураження персоналу електричною енергією; планування та виконання планових заходів з електробезпеки щодо усунення ланцюга передумов появи електротравм, направлених на мінімізацію ризику електротравматизму; контроль за виконанням планових заходів; оцінювання та аналіз ризику електротравматизму після вжитих заходів; ухвалення рішень із вдосконалення системи електробезпеки.

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

Вступ. Сьогодні практично стосовно всіх функціональних напрямів діяльності і сфер управління організацією (підприємством) розроблено підходи, а в багатьох випадках і стандарти відповідних систем управління. Найбільш розповсюдженими є стандартизовані підходи систем менеджменту якості (ISO 9001), екологічного менеджменту (ISO 14001), охорони праці та промислової безпеки (OHSAS 18001, BS 8800).

Аналіз наукових праць [1–5] показав, що існують два основних практичних підходів щодо побудови систем управління. Перший полягає у створенні інтегральної системи на базі системи управління якістю з подальшим впровадженням систем в таких сферах, як екологія, охорона праці, соціальна відповідальність, інформаційна безпека, енергетичний менеджмент. Другий підхід базується на функціонуванні єдиної системи управління, яка охоплює різні сфери. Реалізація згаданих підходів супроводжувалась розробленням і прийняттям відповідних нормативних документів на національному, галузевому та міжнародному рівнях.

Зараз на електричних станціях, підстанціях на підприємствах електричних мереж напругою 330–750 кВ (тобто НВН) в експлуатації знаходиться велика кількість силового та комутаційного обладнання, яке відпрацювало чимало років і потребує реконструкції та збільшення кількості проведення ремонтних робіт в електроустановках НВН і, відповідно, призводить до підвищення ризику електротравматизму [6]. Для мінімізації ризику електротравматизму та професійного захворювання, на підприємствах паливно-енергетичного комплексу України стали впроваджуватися міжнародні стандарти OHSAS 18001:2007 «Системи менеджменту професійного здоров'я і безпеки – Вимоги», ISO 50001:2011 «Система енергетичного менеджменту – вимоги та керівництво щодо застосування».

Публікації із оцінювання та аналізу ризику електротравматизму та професійного захворювання [3–5], що з'являються, відрізняються суперечністю факторів дії електрики, точністю методів оцінювання ризику, спірністю трактувань, визначень, не містять системних рекомендацій щодо рішення проблеми менеджменту електробезпеки.

Тому розробка сучасної системи менеджменту електробезпеки для персоналу, що обслуговує електричні підстанції НВН, є актуальним, а її реалізація є якісно новим етапом вдосконалення системи менеджменту електробезпеки в Україні.

Мета дослідження. Для мінімізації ризику виробничого травматизму та професійного захворювання удосконалити принцип побудови сучасної системи менеджменту електробезпеки на електричних станціях, підстанціях та електричних мережах НВН від впливу електричного поля промислової частоти (ЕП ПЧ) шляхом врахування структурної моделі системи управління електробезпекою та алгоритму аналізу ризику електротравматизму.

Результати дослідження. У ході дослідження встановлено, що Міжнародний стандарт OHSAS 18001:2007, ISO 50001:2011, як і система управління якістю ISO 9000, побудовані на основі циклу Демінга, який фактично дублює коло менеджменту та складається з чотирьох етапів: планування, реалізація, контроль та оцінювання ризику з метою управління. Проте проведений аналіз свідчить, що більшість механізмів цієї страхової системи від професійних ризиків (інформаційні, діагностичні, фінансові та правові) ще тільки створюються. Для організацій, що впроваджують і підтримують дані стандарти, на перший план виступають питання ідентифікації небезпек різних видів діяльності, оцінювання професійних ризиків здоров'ю людини і забезпечення безпеки виробничої діяльності [7].

Автори вважають абсолютно неприйнятним досягнення мети зниження електротравматизму шляхом так званого «управління ризиком», як зазначено в роботах [1, 2]. Перш за все, через некоректність даного словосполучення. Це стає абсолютно очевидним, якщо виходити з термінології міжнародних і вітчизняних стандартів із оцінювання ризиків і теорії управління. Управління – це процес, що включає розробку альтернативних управлінських дій, ухвалення рішення про вибір з них найбільш ефективних (за вибраним критерієм) і їх здійснення з метою досягнення бажаного результату функціонування керованого об'єкта. При цьому під об'єктом маємо на увазі лише те явище зовнішнього і внутрішнього світу, яке спостерігає (або може спостерігати) людина в даний момент. Ризик це поєднання вірогідності виникнення небезпечної події або впливу (ів) з серйозністю травми, або погіршенням здоров'я, які можуть бути викликані такою подією або впливом (ами). Аналізуючи наведені ознаки, неважко побачити, що ризик не може ні самостійно функціонувати, ні мати будь-які результати і мету функціонування, тому управляти ризиком не можна, а ось управляти процесом забезпечення електробезпеки можна.

Основними подіями-передумовами електротравми та професійно обумовленого захворювання при обслуговуванні та ремонті електроустановок 330, 500, 750 кВ є: знаходження персоналу в зоні дії електричної енергії; реальна наявність небезпечного значення електричної енергії; відсутність чи неефективність засобів захисту та помилок і несанкціоновані дії персоналу в цій ситуації [7].

Урахування причин-передумов появи електричної енергії, що діє на електротехнічного працівника, виділених функцій системи електробезпеки та системного підходу, відповідно [8], дозволило авторам

запропонувати структурну модель системи управління електробезпекою для мінімізації ризику електротравматизму, яка наведена на рис.1.

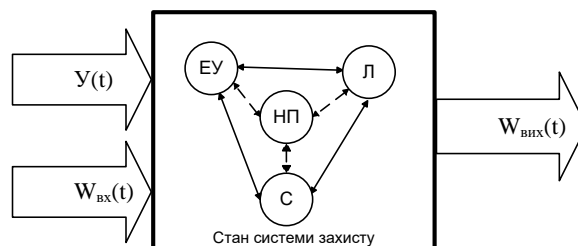


Рисунок 1 – Структурна модель системи управління електробезпекою

В моделі використовуються такі векторні значення: $W_{вх}(t)$ – вхідна дія електричної енергії на систему захисту залежно від часу t ; $W_{вих}(t)$ – вихідна дія електричної енергії із системи захисту на людину залежно від часу t ; $U(t)$ – комплекс заходів та засобів щодо забезпечення безпеки людини від дії електричної енергії на даний час, впровадження яких дозволяє керувати системою захисту.

Наведена на рис. 1 модель є сукупністю взаємопов'язаних елементів: нормативно-правового забезпечення (НП), людини (Л), електроустановки (ЕУ) та зовнішнього середовища (С), необхідних для управління системою захисту від дії електричної енергії для мінімізації ризику електротравматизму в електроустановках НВН.

Оскільки повне усунення шкоди від техногенно-виробничих і природно-екологічних небезпек, пов'язаних з електроустановками НВН на електричних станціях, підстанціях та електричних мережах НВН неможливе, тому для мінімізації ризику електротравматизму персоналу, що обслуговує електроустановки НВН, розглянуто два можливих шляхи.

1-й шлях. При заданих матеріальних витратах Z_{lim} обирається і реалізується така кількість заходів та засобів безпеки з множини m можливих $\{z_m\}$, щоб максимально знизити ризик електротравматизму R :

$$\begin{cases} \Delta R = f(\dots, \{z_i\}, \dots) \rightarrow \max_m, \\ z_i \leq Z_{lim} \\ \{z_i\} \in \{Z_m\} \end{cases} \quad (1)$$

де ΔR – зниження ризику електротравматизму при впровадженні множини $\{z_i\}$ заходів та засобів електробезпеки на об'єкті; z_i – вартість впровадження i -го комплексу заходів щодо забезпечення електробезпеки;

2-й шлях. Мінімізувати сумарні соціально-економічні витрати, тобто вибрати такий набір заходів та засобів електробезпеки з множини можливих, впровадження яких знизить ризик електротравматизму R в електроустановках НВН до допустимого рівня безпеки – R_{don} :

$$\begin{cases} R = f(\dots, \{z_i\}, \dots) \leq R_{don} \\ z_i \rightarrow \min_m \\ \{z_i\} \in \{Z_m\} \end{cases} \quad (2)$$

Перший шлях у соціальному плані найкращий, оскільки тут декларується прагнення гарантовано забезпечити безпеку на максимально можливому рівні, а не на рівні, який диктується «економічними міркуваннями», однак у зв'язку з тим, що для створення таких систем безпеки потрібні відносно великі фінансові ресурси, то пропонується другий шлях мінімізації ризику електротравматизму та вибору засобів і заходів щодо його досягнення. Цей шлях має принципово важливе значення в умовах України.

Проведені теоретичні дослідження, відповідно [8], дозволили сформулювати енергоентропійну концепцію електробезпеки, алгоритм аналізу ризику електротравматизму та запропонувати авторам принцип функціонування системи електробезпеки для персоналу, який обслуговує енергетичні установки на підстанціях НВН для подальшої мінімізації ризику електротравматизму.

Порядок аналізу ризику електротравматизму та професійного захворювання в електроустановках надвисокої напруги для його подальшої мінімізації подано у вигляді блок-схеми (рис. 2).

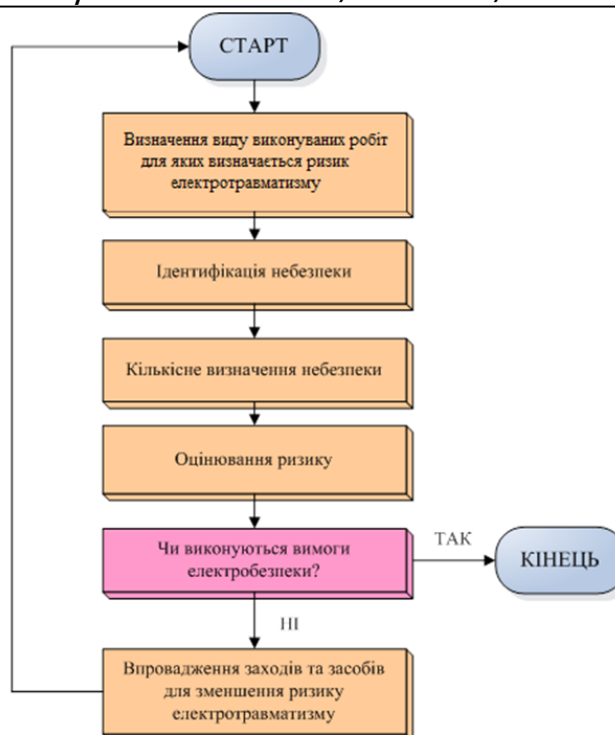


Рисунок 2 – Порядок аналізу ризику електротравматизму та професійного захворювання

Принцип ефективної системи управління електробезпекою (СУЕ) для персоналу електричних станцій, підстанцій та електричних мереж НВН від дії електричної енергії оснований на замкнутому інформаційному контурі. Цей контур містить послідовність логічно пов'язаних функцій управління: оцінювання ризику ураження персоналу електричною енергією; планування та виконання планових заходів з електробезпеки щодо усунення ланцюга передумов появи електротравм, направлених на мінімізацію ризику електротравматизму та професійно обумовленого захворювання; контроль за виконанням планових заходів; оцінювання та аналіз ризику електротравматизму після вжитих заходів; ухвалення рішень із вдосконалення системи електробезпеки, що дозволяє постійно порівнювати фактичний стан керованого процесу, з метою мінімізації ризику електротравматизму.

На першому етапі створення СУЕ визначена мета системи управління електробезпекою в електроустановках НВН. На відміну від існуючих уявлень, підвищення рівня електробезпеки для персоналу, що взаємодіє з електроустановками НВН, досягається завдяки впровадженню заходів на усунення апріорних зв'язків передумов направлених на мінімізацію ризику електротравм при організації робіт в електроустановках 330–750 кВ.

На другому етапі обрано підхід для реалізації указаної стратегії. Відповідно до якого розробка та реалізація захисних заходів з електробезпеки прийматися з урахуванням запропонованих методів оцінювання ризику електротравматизму та професійно обумовленого захворювання персоналу від дії електричної енергії.

На третьому етапі створення СУЕ здійснюється впровадження розроблених заходів та засобів на підприємствах паливо-енергетичного комплексу (ПЕК) щодо забезпечення безпеки людини від дії електричної енергії. На цьому етапі необхідно враховувати всі організаційні заходи із впровадження системи управління електробезпекою: витрати на впровадження СУЕ на ПЕК; фінансові, людські ресурси, необхідні для реалізації системи СУЕ на ПЕК; рівень прийняття положень СУЕ на ПЕК, підтримку їх як керівництвом галузі так і працівниками підрозділів, профспілками; можливі помилки та інше.

Новизна обраного практичного принципу щодо побудови СУЕ на ПЕК полягає в тому, що він, на відміну від існуючих, дозволяє адаптувати законодавство Європейського Союзу з безпеки праці до законодавства України з охорони праці в енергетичній галузі та отримати подальший розвиток методів оцінювання ризику електротравматизму. Розроблений принцип технічно реалізовано у способі забезпечення електробезпеки при виконанні робіт на струмовідних частинах електроустановок НВН, що дозволило мінімізувати ризик електротравматизму при виконанні даного виду робіт на підприємствах ПЕК України [8].

Висновки:

1. Для удосконалення системи управління електробезпекою в електроустановках 330–750 кВ з метою мінімізації ризиків електротравматизму та професійного захворювання в Україні пропонується впровадити міжнародні стандарти менеджменту в енергетичній галузі.

2. Проведений аналіз стандартів OHSAS 18001:2007 «Системи менеджменту професійного здоров'я і безпеки – Вимоги», ISO 50001:2011 «Система енергетичного менеджменту – вимоги та керівництво щодо застосування» свідчить, що більшість механізмів цієї страхової системи від професійних ризиків (інформаційні, діагностичні, фінансові та правові) ще тільки створюються.

3. Пропонується розробити рекомендації щодо впровадження указаних стандартів на підприємствах паливно-енергетичного комплексу України. Прийняти запропоновану методологічну концепцію мінімізації професійного ризику від впливу електричного поля ПЧ на персонал, що обслуговує діючі електротехнічні установки НВН, та обрати запропонований шлях для її реалізації.

4. Використання запропонованого порядку аналізу ризику електротравматизму та принципу менеджменту електробезпеки дозволяють врахувати специфіку підприємств енергетичної галузі в області професійного здоров'я і безпеки та підвищити ефективність впровадження стандартів OHSAS 18001:2007, ISO 50001:2011.

Список використаної літератури

1. Глущенко В. В. Управление рисками. Страхование. / Глущенко В. В. – г. Железнодорожный Моск. обл.: Крылья, 1999. – 336 с.

2. Цай Т. Н., Грабовый П. Г. Конкуренция и управление рисками на предприятиях в условиях рынка / Т. Н. Цай, П. Г. Грабовый – М.: Аланс, 1997. – 288 с.

3. Рижков В. Г. Застосування ризик-орієнтовного підходу для аналізу електротравматизму на металургійних підприємствах. / В. Г. Рижков, О. В. Новощона // Металургія: зб. наук. праць ЗДІА: Вип. 23 – Запоріжжя. 2011. – С. 180-186.

4. Кальки Валдис. Основные направления оценки рисков рабочей среды / Валдис Кальки, Иммант Кристиньш, Жения Роя. – Рига : SIA «Jelgavas tipografija», 2005. – 73 с.

5. Никольский О. К. Новый взгляд на техногенную безопасность в контексте теории оптимизации и риска / Никольский О. К., Ерёмин Т. В., Семичевский П. И. // Вестник Алтайского государственного технического университета им. И. И. Ползунова. – 2009. – № 4. С. 20-25.

6. Рубаненко О. Є. Вдосконалення методів і засобів діагностування високовольтних вимикачів: монографія / О. Є. Рубаненко. – Вінниця : ВНТУ, 2012. – 188 с.

7. Бондаренко Є. А. Удосконалення методу забезпечення електробезпеки під час виконання робіт на струмовідних частинах електроустановок надвисоких класів напруги/ Є. А. Бондаренко, В. М. Кутін // НТУУ «КПІ». "ЕНЕРГЕТИКА: економіка, технології, екологія". – 2014. – № 4 (38). – С. 26–34.

8. Bondarenko E. A. New view on electrical safety in the context of the theory of the system analysis / E. A. Bondarenko, K. V. Bezpalyy // Science and Education: materials of the 2nd international research and practice conference, Vol. I, December 18th-19th, 2012. Publishing office Vela Verlag Waldkraiburg. – Germany, p.105-112.

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

O. Rubanenko, Cand. Sc., Assoc. Prof.

N. Manzhak

«Vinnitsa National Technical University»

IMPROVEMENT OF THE PRINCIPLE OF CONSTRUCTION OF MODERN MANAGEMENT SYSTEM FOR ELECTRICAL POWER STATION, SUBSTATION AND ELECTRIC NETWORKS ULTRAHIGH VOLTAGE CLASS

The articles have standards of the European systems of management of the various activities and management areas. A structural model of the control system of electrical safety, the algorithm of electro safety risk and principle of operation of electrical systems ultrahigh voltage analyzed. Proposed System electrical principle of electric energy is based on. The principle of management is based by electro security system on the closed information contour. Proposed System electrical principle of electric energy is based on a closed loop information. his contour contains sequence of logically connected functions of management: an estimation of risk of defeat of the personnel electric energy; planning and performance of planned actions which eliminate preconditions of occurrence of

electro traumas; control of performance of planned actions; an estimation and the analysis of risk of an electro traumatism after the accepted measures; decision-making on perfection of system of an electro security.

References

1. Glyshenko V.V. Management of risks. Zheleznodorozhnyi: Krylya, 1999, 336 p.
2. Czaj T.N., Grabovij. Competition and management risks on enterprises in the conditions of market. Moskva: Alans, 1997. 288 p.
3. Rizhkov, V.G. and Novoshchonova, O.V. (2011), "Application hazard for the analysis electro traumas at the metallurgical enterprises", Metallurgy: *Naukovi pratsi ZDIA, Zaporozhye*, vol. 23, pp. 180-186.
4. Kalki Valdis, Imant Kristinsh, Zheniva Roya. Osnovnye napravleniya ocenki riskov rabochej sredy. Riga: SIA «Jelgavas tipografija», 2005. 73 p.
5. Nikolsky, O. K., Eryomina, T. V and Semichevsky P.I. "New view on technogenic safety in a context of the theory of optimization and risk", *Visnyk Altayskoho technichnoho universiteta*, 2009; vol. 4, pp. 20-25.
6. Rubanenko O. E. Improvement of methods and means діагностирования high-voltage switches : monography / O. E. Rubanenko. – Vinnitstsya : VNTU, 2012. – 188 p.
7. Bondarenko E. A. Improvement of a method of an electro security during performance works on current carrying parts of electro installations ultrahigh voltedg / E. A., Bondarenko V. M. Kutin // NTUU «KPI». "Energetika: ekonomika, tekhnologiya, ekologiya". – 2014. – № 4 (38). – pp. 26–34.
8. Bondarenko E. A. New view on electrical safety in the context of the theory of the system analysis / E. A. Bondarenko, K. V. Bezpaly // Science and Education: materials of the 2nd international research and practice conference, Vol. I, December 18th-19th, 2012. Publishing office Vela Verlag Waldkraiburg. – Germany, p.105-112.

УДК 621.3:614.8

Е. А. Бондаренко, д-р техн. наук, доц.

А.Е. Рубаненко, канд.техн.наук, доц.

Н.О. Манжак

Винницкий национальный технический университет

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРИНЦИПА ПОСТРОЕНИЯ СОВРЕМЕННОЙ СИСТЕМЫ МЕНЕДЖМЕНТА ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТИ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЯХ, ПОДСТАНЦИЯХ И СЕТЯХ СВЕРХВЫСОКИХ КЛАССОВ НАПРЯЖЕНИЯ

Рассмотрены наиболее распространенные европейские стандарты систем менеджмента различных направлений деятельности и сфер управления. Разработана структурная модель системы управления электробезопасности и алгоритм анализа риска электротравматизма. Это позволило предложить принцип функционирования системы электробезопасности для электротехнического персонала, обслуживающего энергетические установки на станциях, подстанциях и электрических сетях сверхвысоких классов напряжения. Принцип управления системой электробезопасности от действия электрической энергии основан на замкнутом информационном контуре. Этот контур содержит последовательность логически связанных функций управления: оценка риска поражения персонала электрической энергией; планирование и выполнение плановых мероприятий, которые устраняют предпосылки появления электротравм; контроль выполнения плановых мероприятий; оценка и анализ риска электротравматизма после принятых мер; принятие решений по совершенствованию системы электробезопасности.

Ключевые слова: электрическая подстанция, электроустановка, энергия, электрическое поле, менеджмент, риск, электробезопасность.

Надійшла 07.04.2017

Received 07.04.2017

МІЖГАЛУЗЕВІ ПРОБЛЕМИ І СИСТЕМНІ ДОСЛІДЖЕННЯ В ПАЛИВНО-ЕНЕРГЕТИЧНОМУ СЕКТОРІ CROSS-SECTORAL PROBLEMS AND SYSTEM STUDIES IN THE FUEL AND ENERGY SECTOR

УДК 532.551

В.В. Онищук, канд. техн. наук, старш. наук. співроб., ORCID 0000-0003-3406-8778
Київський національний університет імені Тараса Шевченка

ТЕОРЕТИЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ НАПІРНОГО ТРУБОПРОВОДУ НА ОСНОВІ РОЗВ'ЯЗУВАННЯ СИСТЕМИ РІВНЯНЬ НАВ'Є – СТОКСА

На основі аналітичного розв'язування замкненої системи рівнянь Нав'є-Стокса виконана оцінка гідроморфологічного стану напірного потоку при динамічній рівновазі системи «стояча хвиля – хвиля деформації». За отриманими розрахунковими формулами на конкретному прикладі оцінено структуру напірного потоку. Соліноїдальний рух субстанції в напірному трубопроводі є яскравим підтвердженням принципу мінімуму дисипації енергії у відкритій системі. Цей рух субстанції обумовлений дією трьох масових сил – гідродинамічного напору, стоячої хвилі в умовах сповільненої течії і поперечним розпором на фоні заблокованого прояву явища меандрування. Отримані результати розрахунків характеристик напірного потоку дають можливість стверджувати про наявності в центрі труби стійкого ядра. Ядро потоку являє собою центральну частину мезовира, який обертається проти годинникової стрілки і, таким чином, підтримує у поперечному вимірі динамічну рівновагу системи «напірний потік – стояча хвиля».

Ключові слова: гідродинамічна система «стояча хвиля – хвиля деформації», динамічна рівновага системи, соліноїдальна траєкторія руху субстанції, система рівнянь Нав'є – Стокса, ядро водотоку.

Вступ

Будь-яка відкрита або закрита динамічна система наділена властивостями самоорганізації і саморегулювання. Кожна відкрита система по своїй природі є дисипативною, а також адаптивною до змін навколишнього середовища, що дає змогу їй проявити свою індивідуальність (ідентифікуватись) і, таким чином, себе зберегти. Існуючі методи визначення пропускної здатності напірного трубопроводу потребують теоретичного обґрунтування. Розв'язання замкненої системи рівнянь Нав'є-Стокса, на нашу думку, дасть можливість більш повно висвітлити гідроморфодинамічну структуру потоку в напірному трубопроводі.

Методика

На сьогоднішній день не існує аналітичного розв'язання замкненої системи рівнянь Нав'є-Стокса для коректного рішення задач гідроаеромеханіки, які б могли бути використані в багатьох суміжних областях знань про навколишній матеріальний світ. Ці рівняння уже відомі майже 200 років, які пройшли широке випробування при вирішенні багатьох задач з ламінарним режимом течії, але знаходяться поза зоною досяжності для турбулентного потоку ньютонівської рідини при високих числах Рейнольдса [1-3]. При розгляді рівнянь Нав'є-Стокса належить розвести дію силових факторів на їх індивідуальний рівень функціонування зі збереженням динамічної рівноваги системи та їх послідовну оцінку за умовами виконання конкретної задачі. З методичної точки зору це можна досягти шляхом стабілізації режиму турбулентності субстрату (субстанції) за допомогою додаткового рівняння і шляхом їх сумісного розв'язування відповідне виокремлення агентів збурення, тобто гідродинамічного тиску і його наслідку – прояву у вигляді змін форми деформації суцільного середовища. Цей підхід, який можна назвати «замороженою» турбулентністю, належить використовувати як для самого потоку, так і для його пристінного шару. У цьому контексті також слід зауважити, що у даній постановці задач розглядається безперервно-дискретний характер розвитку процесів просторової деформації субстанції, що пояснюється використанням балансового рівняння (5). Наведена нижче система рівнянь була апробована в роботах [4,5].

Результати і обговорення

Рівняння Нав'є - Стокса - це система диференціальних рівнянь у частинних похідних, що описують рух і теплопередачу в'язкої ньютонівської рідини. Рівняння Нав'є - Стокса є одними з найважливіших у гідродинаміці й застосовуються в математичному моделюванні багатьох природних явищ і технічних задач. Зазвичай система рівнянь складається з рівняння руху рідини, рівняння збереження енергії, маси і імпульсу сили та рівняння неперервності рідини, які є неповними для точного розв'язування як плоских, так і просторових задач гідродинаміки. Досить важливим аспектом є оцінка гідравлічного режиму напірного трубопроводу на основі розв'язування цієї системи рівнянь.

Напірний потік в трубопроводі це складна відкрита дисипативна гідродинамічна система «стояча хвиля – хвиля деформації», яка наділена властивістю самоорганізації і саморегулювання при безперервно-дискретному русі субстанції. З метою оцінки динамічної рівноваги зазначеної системи пропонується до розв'язування наступна система рівнянь:

$$* \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} = -(\bar{v} \cdot \nabla) \bar{v} + \nu \Delta \bar{v} - \frac{1}{\rho} \nabla p - \nabla \operatorname{div} H + \left(\zeta + \frac{\nu}{3} \right) \delta_i \nabla \operatorname{div} \bar{v}; \quad (1)$$

$$* \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} = \nu \Delta \bar{v} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \nabla \bar{v}'; \quad (2)$$

$$* \frac{\partial \bar{v}'}{\partial t} = -(\bar{v}' \cdot \nabla) \bar{v}' + \nu \Delta \bar{v}' - \frac{1}{\rho} \nabla p + \left(\zeta_{\Delta} + \frac{\nu}{2} \right) \delta_{\Delta, i} \nabla \operatorname{div} h; \quad (3)$$

$$* \frac{\partial \bar{v}'}{\partial t} = -(\bar{v}' \cdot \nabla) \bar{v}' - \frac{1}{\rho} \nabla p; \quad (4)$$

$$* \frac{\partial Q}{\partial t} = \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial l}{\partial t} - \frac{\partial h_w}{\partial t}; \quad (5)$$

$$* \frac{\partial W}{\partial t} = \rho g H \frac{\partial Q}{\partial t}; \quad (6)$$

$$* \frac{\partial Q}{\partial t} = 19,67 \cdot h^{2,5} (\lambda l)^{-0,5} \frac{\partial H^{0,5}}{\partial t}; \quad (7)$$

$$* \frac{\partial W}{\partial t} = \rho g H \frac{\partial v}{\partial t}; \quad (8)$$

$$* \frac{\partial \delta_x^{0,5}}{\partial t} = \Delta h_w \frac{\partial H^2}{\partial t}; \quad (9)$$

$$* \frac{\partial \delta_y^2}{\partial t} = 0,5 (S_{c.x} / l) \frac{\partial H^2}{\partial t}; \quad (10)$$

$$* \frac{\partial \delta_z^2}{\partial t} = 0,5 (S_{c.x} / l) \frac{\partial H^2}{\partial t}; \quad (11)$$

$$* \frac{\partial W^{0,5}}{\partial t} = \Delta h_w, \quad (12)$$

де ∇ - оператор Гамільтона; Δ - оператор Лапласа; ρ – густина субстанції, кг/м³; p – тиск субстанції, кгс/м²; ν - коефіцієнт кінематичної в'язкості, м²/с; g – прискорення сили земного тяжіння, м/с²; ζ - «друга» (об'ємна) в'язкість водного потоку, яка придбана після його стискання стоячою хвилею; кг/м·с; ζ_A - «друга» (об'ємна) в'язкість водного потоку, яка придбана після його стискання товщею водного потоку; кг/м·с; H – гідравлічний напір в трубопроводі, м; h – глибина потоку навколо його динамічної осі, яка домірна радіусу труби, м; l – довжина контуру гвинтового руху субстанції, м; ℓ - довжина трубопроводу, м; W – об'єм стоку води в трубопроводі при стаціонарному гідравлічному режимі, м³; Q – об'ємна витрата води при стаціонарному гідравлічному режимі, м⁴/с; λ - коефіцієнт гідравлічного тертя; Δh_w – доля втрати напору за довжиною трубопроводу, м; δ_i - величина переміщення структурних елементів водного потоку (мезовирів) по координатах x , y і z , м; δ_{Ai} - величина переміщення структурних елементів водного потоку у пристінному шарі (мікровирів) по координатах x , y , м; v – середня швидкість напірного потоку на ділянці стаціонарного гідравлічного режиму, м/с.

В аналіз розв'язування системи рівнянь Нав'є-Стокса до теперішнього часу входило коректне рішення задачі Коші, оскільки можливість стійкого рішення у значній мірі залежало від рівня турбулентності потоку при великих числах критерію Рейнольдса, а також пов'язаних з ним інших критеріїв. Наведені вище рівняння складають замкнену систему для умов напірного потоку; рівняння (1) описує рух рідини в координатах x , y і z ; рівняння (2) стосується стабілізації режиму турбулентності напірного потоку («заморожена» турбулентність) в координатах x , y і z ; рівняння (3) оцінює рівень турбулентності рідини у пристінному шарі потоку в координатах x , y і z ; рівняння (4) стосується стабілізації режиму тиску в пристінному шарі потоку («заморожений» конвекційний рух субстанції) в координатах x , y і z ; рівняння (5) - це неперервність процесів деформації в трубопроводі (баланс субстанції, який характерний для стану динамічної рівноваги системи «стояча хвиля – хвиля деформації»); рівняння (6) характеризує просторові деформації у поздовжньому розрізі (оцінює поздовжню стійкість водотоку); рівняння (7) відповідає пропускній здатності водотоку; рівняння (8) визначає поперечну стійкість водотоку по його довжині; рівняння (9) описує переміщення структурних елементів потоку в координаті x ; рівняння (10) характеризує переміщення структурних елементів потоку в координаті y ; рівняння (11) оцінює переміщення структурних елементів потоку в координаті z ; рівняння (12) характеризує втрату напору на ділянці зі стаціонарним режимом.

У розкритій формі, з урахуванням складової поздовжнього стискання напірного потоку, рівняння Нав'є - Стокса приймає наступний вигляд [2]:

$$\begin{aligned} \rho' \left(\frac{\partial v_x}{\partial t} \right) = & -\rho' \left(v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) - \frac{\partial p_x}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial x} - \frac{2}{3} \delta_x \frac{\partial v_x}{\partial x} \right) \right] + \\ & + \rho' \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\zeta + \frac{\mu}{3} \right) \frac{\partial v_x}{\partial x} \delta_x \right] - \rho' \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial H_x}{\partial t} \right) \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \rho' \left(\frac{\partial v_y}{\partial t} \right) = & -\rho' \left(v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) - \frac{\partial p_y}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial y} - \frac{2}{3} \delta_y \frac{\partial v_y}{\partial y} \right) \right] + \\ & + \rho' \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\zeta + \frac{\mu}{3} \right) \frac{\partial v_y}{\partial y} \delta_y \right] - \rho' \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial H_y}{\partial t} \right) \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \rho' \left(\frac{\partial v_z}{\partial t} \right) = & -\rho' \left(v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) - \frac{\partial p_z}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial v_z}{\partial z} + \frac{\partial v_x}{\partial z} - \frac{2}{3} \delta_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) \right] + \\ & + \rho' \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(\zeta + \frac{\mu}{3} \right) \frac{\partial v_z}{\partial z} \delta_z \right] - \rho' \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial H_z}{\partial t} \right) \end{aligned} \quad (15)$$

де μ – коефіцієнт динамічної в'язкості, кг/м·с.

Таким чином, маємо три рівняння руху рідини в напірному трубопроводі.

У розкритій формі рівняння (2) виглядає наступним чином:

$$\rho \left(\frac{\partial v_x}{\partial t} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial x} - \frac{2}{3} \delta_x \frac{\partial v_x}{\partial x} \right) \right] - \frac{\partial p_x}{\partial x} + \rho \frac{\partial U'_x}{\partial x}; \quad (16)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v_y}{\partial t} \right) = \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial y} - \frac{2}{3} \delta_y \frac{\partial v_y}{\partial y} \right) \right] - \frac{\partial p_y}{\partial y} + \rho \frac{\partial U'_y}{\partial y}; \quad (17)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v_z}{\partial t} \right) = \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial v_z}{\partial z} + \frac{\partial v_x}{\partial z} - \frac{2}{3} \delta_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) \right] - \frac{\partial p_z}{\partial z} + \rho \frac{\partial U'_z}{\partial z}. \quad (18)$$

Маємо три рівняння зі стабілізацією режиму турбулентності потоку.

Далше виконуємо сумісний розв'язок отриманих шістьох рівнянь, шляхом послідовних підстановок рівнянь (16-18) у (13-15)

$$\frac{\partial U'_x}{\partial x} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\zeta_3 \delta_x \frac{\partial v_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial H_x}{\partial x} \right) = 0; \quad (19)$$

$$\frac{\partial U'_y}{\partial y} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial y} \left(\zeta_3 \delta_y \frac{\partial v_y}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial H_y}{\partial y} \right) = 0; \quad (20)$$

$$\frac{\partial U'_z}{\partial z} + v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial z} \left(\zeta_3 \delta_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial H_y}{\partial y} \right) = 0, \quad (21)$$

де $\zeta_3 = \zeta + 0,333\mu$ – загальна величина в'язкості субстанції.

Таким чином, отримуємо наступні три рівняння, які відповідають стабільному станові гідродинамічної системи «ударна хвиля – хвиля деформації», тобто зберігаються умови абсолютної автономності опору стінки трубопроводу у квадратичній області при дії внутрішньої масової сили за межами впливу критеріїв Рейнольдса, Фруда і Томсона у режимі досягнутого рівня турбулентності потоку:

Отримані рівняння (19-21) складають однорідну стаціонарну систему рівнянь Нав'є – Стокса.

Аналітичне розв'язування системи рівнянь для оцінки поздовжньої стійкості напірного потоку. Для вирішення поставленої задачі відібрано із загальної кількості рівнянь наступних п'ять:

$$\frac{\partial U'_x}{\partial x} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\zeta_3 \delta_x \frac{\partial v_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial H_x}{\partial x} \right) = 0; \quad (22)$$

$$\frac{\partial U'_y}{\partial y} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial y} \left(\zeta_3 \delta_y \frac{\partial v_y}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial H_y}{\partial y} \right) = 0; \quad (23)$$

$$\frac{\partial U'_z}{\partial z} + v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial z} \left(\zeta_3 \delta_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial H_y}{\partial y} \right) = 0; \quad (24)$$

$$* \frac{\partial Q}{\partial t} = 19,67 \cdot h^{2,5} (\lambda l)^{-0,5} \frac{\partial H^{0,5}}{\partial t}; \quad (25)$$

$$* \frac{\partial W}{\partial t} = \rho g H \frac{\partial v}{\partial t}. \quad (26)$$

Спочатку підставляємо рівняння (25) в (22), яке у диференційній формі має вигляд

$$\frac{\partial U'_x}{\partial x} \frac{dU'}{dx} + \left[v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\zeta_3 \delta_x \frac{\partial v_x}{\partial x} \right) \right] \frac{dv}{dx} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial H}{\partial x} \right) \frac{dH}{dx} + \frac{\partial Q}{\partial t} \frac{dQ}{dx} - 19,67 h^{2,5} (\lambda \ell)^{-0,5} \frac{\partial H^{0,5}}{\partial t} \frac{dH}{dx} = 0. \quad (27)$$

В інтегральній формі дане рівняння виглядає наступним чином.

$$\int_0^{U_{ap}} \frac{\partial U'_x}{\partial x} \frac{dU'}{dx} + \int_0^{V_{\partial,p}} \left[v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\zeta_3 \delta_x \frac{\partial v_x}{\partial x} \right) \right] \frac{dv}{dx} + \int_0^{H_{\partial,p}} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial H}{\partial x} \right) \frac{dH}{dx} + \int_0^{Q_{\partial,p}} \frac{\partial Q}{\partial t} \frac{dQ}{dx} - \int_0^{H_{\partial,p}} \left(19,67 h^{2,5} (\lambda \ell)^{-0,5} \frac{\partial H^{0,5}}{\partial x} \right) \frac{dH}{dx} = 0 \quad (28)$$

Після інтегрування, при граничних умовах від 0 до $V_{\partial,p}$, $0/Q_{\partial,p}$ і від 0 до $H_{\partial,p}$, отримуємо вираз

$$-U'_{x,\partial,p} - V^2_{x,\partial,p} + 0,333 \zeta_3 \delta_x V^3_{x,\partial,p} - 0,333 H^3_{\partial,p} - Q_{\partial,p} + 13,11 h^{2,5} (\lambda \ell)^{-0,5} H^{1,5}_{\partial,p} = 0.$$

Аналогічним чином виконуємо розв'язок рівнянь по координатах y і z , з яких маємо вирази

$$-U'_{y,\partial,p} - V^2_{y,\partial,p} + 0,333 \zeta_3 \delta_y V^3_{y,\partial,p} - 0,333 H^3_{\partial,p} - Q_{\partial,p} + 13,11 h^{2,5} (\lambda \ell)^{-0,5} H^{1,5}_{\partial,p} = 0;$$

$$-U'_{z,\partial,p} - V^2_{z,\partial,p} + 0,333 \zeta_3 \delta_z V^3_{z,\partial,p} - 0,333 H^3_{\partial,p} + 13,11 h^{2,5} (\lambda \ell)^{-0,5} H^{1,5}_{\partial,p} = 0.$$

З даних виразів отримуємо формули для визначення віртуальної витрати води, коефіцієнта гідравлічного тертя і гідродинамічного напору при динамічній рівновазі внутрішніх і зовнішніх масових сил

$$Q_{\partial,p} = -U'_{x,\partial,p} - V^2_{x,\partial,p} + 0,333 \zeta_3 \delta_x V^3_{x,\partial,p} - 0,333 H^3_{\partial,p} + 13,11 h^{2,5} (\lambda \ell)^{-0,5} H^{1,5}_{\partial,p}; \quad (29)$$

$$\frac{1}{\lambda^{0,5}} = \frac{U'_{y,\partial,p} + V^2_{y,\partial,p} - 0,333 \zeta_3 \delta_y V^3_{y,\partial,p} - 0,333 H^3_{\partial,p} + Q_{\partial,p}}{13,11 h^{2,5} (\ell)^{-0,5} H^{1,5}_{\partial,p}}; \quad (30)$$

$$H_{\partial,p} = \left(\frac{13,11 h^{2,5} (\lambda \ell)^{-0,5}}{0,333} \right)^{0,667}. \quad (31)$$

Дальше рівняння (26) підставляємо в (22), яке у диференційній формі має вигляд

$$\frac{\partial U'_x}{\partial x} \frac{dU'}{dx} + \left[v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\zeta_3 \delta_x \frac{\partial v_x}{\partial x} \right) \right] \frac{dv}{dx} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial H}{\partial x} \right) \frac{dH}{dx} + \left(\frac{\partial W}{\partial t} - \rho g H \frac{\partial v}{\partial t} \right) \frac{dv}{dx} = 0. \quad (32)$$

В інтегральній формі дане рівняння виглядає наступним чином.

$$\int_0^{U_{ap}} \frac{\partial U'_x}{\partial x} \frac{dU'}{dx} + \int_0^{V_{\partial,p}} \left[v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\zeta_3 \delta_x \frac{\partial v_x}{\partial x} \right) \right] \frac{dv}{dx} + \int_0^{H_{\partial,p}} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial H}{\partial x} \right) \frac{dH}{dx} + \int_0^W \frac{\partial W}{\partial t} \frac{dW}{dx} - \int_0^{V_{\partial,p}} \left(\rho g H \frac{\partial v}{\partial t} \right) \frac{dv}{dx} = 0. \quad (33)$$

Після інтегрування, при граничних/крайових умовах від 0 до $V_{\partial,p}$, $0/H_{\partial,p}$ і від 0 до W з даного рівняння отримуємо наступний вираз

$$-U'_{x,\partial,p} - V^2_{x,\partial,p} + 0,333 \zeta_3 \delta_x V^3_{x,\partial,p} - 0,333 H^3_{\partial,p,x} - W + \rho g H V_{\partial,p} = 0.$$

Аналогічним чином виконуємо розв'язок рівнянь по координатах y і z , з яких маємо вирази

$$\begin{aligned} -U'_{y,\partial,p} - V^2_{y,\partial,p} + 0,333\zeta_3\delta_y V^3_{y,\partial,p} - 0,333.H^3_{\partial,p,y} + \rho g H V_{\partial,p} &= 0; \\ -U'_{z,\partial,p} - V^2_{z,\partial,p} + 0,333\zeta_3\delta_z V^3_{z,\partial,p} - 0,333H^3 &= 0, \end{aligned}$$

з яких отримуємо формулу для визначення об'єму стоку води від початку роботи трубопроводу до встановлення стаціонарного гідралічного режиму

$$W_{\partial,p} = -U'_{x,\partial,p} - V^2_{x,\partial,p} + 0,333\zeta_3\delta_x V^3_{x,\partial,p} - 0,333H^3_{\partial,p,x} + \rho g H V_{\partial,p}. \quad (34)$$

Аналітичне розв'язування системи рівнянь для оцінки деформацій потоку під впливом стоячої хвилі. З метою вирішення цієї задачі відібрані наступні рівняння:

$$\frac{\partial U'_x}{\partial x} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\zeta_3 \delta_x \frac{\partial v_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\frac{\mu}{2} \right) \frac{\partial H_x}{\partial x} \right] = 0; \quad (35)$$

$$\frac{\partial U'_y}{\partial y} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial y} \left(\zeta_3 \delta_y \frac{\partial v_y}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial H_y}{\partial y} \right) = 0; \quad (36)$$

$$\frac{\partial U'_z}{\partial z} + v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial z} \left(\zeta_3 \delta_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial H_y}{\partial y} \right) = 0; \quad (37)$$

$$* \frac{\partial Q}{\partial t} = \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial l}{\partial t} - \frac{\partial h_w}{\partial t}; \quad (38)$$

$$* \frac{\partial W}{\partial t} = \rho g H \frac{\partial v}{\partial t}; \quad (39)$$

Розв'язуємо рівняння (38 і 39) разом з (35-37), які в інтегральній формі мають наступний вигляд:

$$\int_0^{U_{\partial,p}} \frac{\partial U'_x}{\partial x} \frac{dU'}{dx} + \int_0^{V_{\partial,p}} \left[v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\zeta_3 \delta_x \frac{\partial v_x}{\partial x} \right) \right] dv + \int_0^{H_{\partial,p}} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial H}{\partial x} \right) \frac{dH}{dx} + \int_0^{Q_{\partial,p}} \frac{\partial Q}{\partial t} \frac{dQ}{dx} - \int_0^{H_{\partial,p}} \frac{\partial H}{\partial t} \frac{dH}{dx} - \quad (40)$$

$$- \int_0^{l_{\partial,p}} \frac{\partial l}{\partial t} \frac{dl}{dx} - \int_0^{q_s} \frac{\partial h_w}{\partial t} \frac{dh_w}{dx} + \int_0^{W_{\partial,p}} \frac{\partial W}{\partial t} \frac{dW}{dx} - \int_0^{V_{\partial,p}} \left(\rho g H \frac{\partial v}{\partial t} \right) \frac{dv}{dx} = 0$$

$$\int_0^{U_{\partial,p}} \frac{\partial U'_y}{\partial y} \frac{dU'}{dy} + \int_0^{V_{\partial,p}} \left[v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial y} \left(\zeta_3 \delta_y \frac{\partial v_y}{\partial y} \right) \right] dv + \int_0^{H_{\partial,p}} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial H}{\partial y} \right) \frac{dH}{dy} + \int_0^{Q_{\partial,p}} \frac{\partial Q}{\partial t} \frac{dQ}{dy} - \int_0^{H_{\partial,p}} \frac{\partial H}{\partial t} \frac{dH}{dy} - \quad (41)$$

$$- \int_0^{V_{\partial,p}} \left(\rho g H \frac{\partial v}{\partial t} \right) \frac{dv}{dy} = 0$$

$$\int_0^{V_{\partial,p}} \left[\frac{\partial U'_z}{\partial z} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial z} \left(\zeta_3 \delta_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) \right] dV + \int_0^{H_{\partial,p}} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial H}{\partial y} \right) \frac{dH}{dy} - \int_0^{H_{\partial,p}} \frac{\partial H}{\partial t} \frac{dH}{dy} = 0. \quad (42)$$

Після інтегрування, при граничних умовах від 0 до $V_{\partial,p}$, і від 0 до $H_{\partial,p}$, з даних рівнянь отримуємо наступні вирази:

$$\begin{aligned} -U'_{x,\partial,p} - V^2_{x,\partial,p} + 0,333\zeta_3 \delta_x V^3_{x,\partial,p} - 0,333.H^3_{\partial,p} - Q_{\partial,p} + H_{\partial,p} + l_{\partial,p,x} + h_{w,\partial,p} - W + \rho g H.V_{\partial,p} &= 0; \\ -U'_{y,\partial,p} - V^2_{y,\partial,p} + 0,333\zeta_3 \delta_y V^3_{y,\partial,p} - 0,333.H^3_{\partial,p} - Q_{\partial,p} + H_{\partial,p} + \rho g H.V_{\partial,p} &= 0; \\ -U'_{z,\partial,p} - V^2_{z,\partial,p} + 0,333\zeta_3 \delta_z V^3_{z,\partial,p} - 0,333.H^3_{\partial,p} + H_{\partial,p} + l_{\partial,p,z} &= 0. \end{aligned}$$

З отриманих виразів маємо наступні розрахункові формули для визначення довжини переміщення субстанції у вигляді мікрочирів навколо ядра:

$$l_{\partial,p,x} = U'_{x,\partial,p} + V^2_{x,\partial,p} - 0,333\zeta_3 \delta_x V^3_{x,\partial,p} + 0,333.H^3_{\partial,p} + Q_{\partial,p} - H_{\partial,p} - h_{w,\partial,p} + W - \rho g H.V_{\partial,p}; \quad (43)$$

$$l_{\partial,p,z} = U'_{z,\partial,p} - V^2_{z,\partial,p} - 0,333\zeta_3 \delta_z V^3_{z,\partial,p} + 0,333.H^3_{\partial,p} - H_{\partial,p}; \quad (44)$$

Аналітичне розв'язування системи рівнянь для оцінки соліноідального руху субстанції. Для вирішення цієї задачі відібрано наступних п'ять рівнянь:

$$\frac{\partial U'_x}{\partial x} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\zeta_3 \delta_x \frac{\partial v_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial H_x}{\partial x} \right) = 0; \quad (45)$$

$$\frac{\partial U'_y}{\partial y} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial y} \left(\zeta_3 \delta_y \frac{\partial v_y}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial H_y}{\partial y} \right) = 0; \quad (46)$$

$$\frac{\partial U'_z}{\partial z} + v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial z} \left(\zeta_3 \delta_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial H_z}{\partial y} \right) = 0, \quad (47)$$

$$* \frac{\partial W}{\partial t} = \rho g H \frac{\partial Q}{\partial t}; \quad (48)$$

$$* \frac{\partial Q}{\partial t} = 19,67.h^{2,5} (\lambda l)^{-0,5} \frac{\partial H^{0,5}}{\partial t}. \quad (49)$$

Підставляємо рівняння (49) в (48)

$$\frac{\partial W}{\partial t} - 19,67 \rho g H h^{2,5} (\lambda l)^{-0,5} \frac{\partial H^{0,5}}{\partial t} = 0. \quad (50)$$

Далі це рівняння підставляємо в (45), яке в диференційній формі має вигляд

$$\begin{aligned} \frac{\partial U'_y}{\partial y} \frac{dU'}{dy} + \left[v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial y} \left(\zeta_3 \delta_y \frac{\partial v_y}{\partial y} \right) \right] \frac{dv}{dy} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial H}{\partial y} \right) \frac{dH}{dy} + \frac{\partial W}{\partial t} \frac{dW}{dy} - \\ - \left(19,67 \cdot \rho g H h^{2,5} (\lambda_c l_c)^{-0,5} \frac{\partial H^{0,5}}{\partial t} \right) \frac{dH}{dy} = 0 \end{aligned} \quad (51)$$

Після інтегрування, при граничних умовах від 0 до $V_{\partial,p}$, $0/H_{\partial,p}$ і від 0 до $W_{\partial,p}$, з даного рівняння отримуємо наступний вираз:

$$-U'_{y,\partial,p} - V^2_{y,\partial,p} + 0,333\zeta_3 \delta_y V^3_{y,\partial,p} - 0,333H^3_{\partial,p} + 13,11 \cdot \rho g h^{2,5} H (\lambda l)^{-0,5} H^{1,5} = 0.$$

З цього виразу отримуємо формулу

$$h_{\partial.p} = \left(\frac{U'_{y.\partial.p} + V^2_{y.\partial.p} - 0,333\zeta_y V^3_{y.\partial.p} - 0,333H^3_{\partial.p}}{13,11\rho g H (\lambda \ell)^{-0,5} H^{1,5}} \right)^{0,4}. \quad (52)$$

Для визначення компонент швидкості потоку при динамічній рівновазі системи скористаємось рівняннями (38-40). Після інтегрування першого рівняння при граничних умовах від 0 до $V_{\partial.p}$ отримуємо

$$-U'_{x.\partial.p} - V^2_{x.\partial.p} + 0,333\zeta_x \delta_x V^3_{x.\partial.p} - 0,333H^3_{\partial.p} = 0.$$

Після спрощення даного виразу маємо

$$V^2_{\partial.p.x} (0,333\zeta_x \delta_x V_{x.\partial.p} - 1) - U'_{x.\partial.p} - 0,333H^3_{\partial.p} = 0,$$

з якого можна визначити компоненту швидкості потоку по координаті x

$$V_{x.\partial.p} = \frac{1}{0,333\zeta_x \delta_x}. \quad (53)$$

Для двох інших компонент швидкості отримуємо аналогічні формули

$$V_{y.\partial.p} = \frac{1}{0,333\zeta_y \delta_y}; \quad (54)$$

$$V_{z.\partial.p} = \frac{1}{0,333\zeta_z \delta_z}. \quad (55)$$

Оцінка основних розрахункових характеристик. Виконуємо диференціювання та інтегрування рівнянь (9 -11) у межах від 0 до H в результаті чого отримуємо

$$\begin{aligned} -0,667\delta^{1,5}_{x.\partial.p} + 0,333\Delta h_w H^3 &= 0; \\ -0,333\delta^3_{y.\partial.p} + 0,1667(S_{c.x} / \ell) H^3 &= 0; \\ -0,333\delta^3_{z.\partial.p} + 0,1667(S_{c.x} / \ell) H^3 &= 0. \end{aligned}$$

Наведені вирази дозволяють визначити величини переміщення елементарних об'ємів субстанції за наступними формулами:

$$\delta_{x.\partial.p} = (0,5\Delta h_w H^3)^{0,667}; \quad (56)$$

$$\delta_{y.\partial.p} = (0,5(S_{c.x} / \ell) H^3)^{0,333}; \quad (57)$$

$$\delta_{z.\partial.p} = (0,5(S_{c.x} / \ell) H^3)^{0,333}. \quad (58)$$

Втрату напору на ділянці стаціонарного режиму можна оцінити шляхом сумісного розв'язування рівнянь (6 і 12) які показані в інтегральному вигляді

$$\int_0^{w_{0,p}} \int_0^{Q_{0,p}} \left(\Delta h_w \frac{\partial W^{0.5}}{\partial t} - \rho g H \frac{\partial Q}{\partial t} \right) \frac{dQ}{dx} = 0. \quad (59)$$

Після інтегрування при граничних умовах від 0 до $Q_{0,p}$ отримуємо

$$-0.667 \Delta h_w W^{1.5} + \rho g H Q_{0,p} = 0,$$

звідки отримуємо формулу

$$\Delta h_w = \frac{\rho g H Q_{0,p}}{0.667 W^{1.5}}. \quad (60)$$

Для визначення “другої” (об’ємної) в’язкості водного потоку, яка набула після його стискування, рекомендується скористатися емпіричною залежністю, наведеною в монографії Л. Седова [1, с. 327]

$$\zeta_3 = \zeta + \frac{1}{3} \mu = \lambda_0 + \frac{2}{3} \mu + \frac{1}{3} \mu = \lambda_0 + \mu, \quad (61)$$

Для водного потоку жорсткість не має прояву, оскільки вода практично не сприймає нормальних напружень, а тільки дотичні, які виникають при її русі, отже формулу (51) для напірного трубопроводу можна записати у наступному вигляді:

$$\zeta_3 = 2\pi h_{сер} + \mu, \quad (62)$$

де $2\pi h_{сер}$ – висота стоячої хвилі у водному середовищі трубопроводу, яка трансформується в процес формування і підтримування гвинтового руху. Тут $h_{сер}$ домірне радіусу труби.

Аналітичне розв’язування системи рівнянь для оцінки характеристик пристінного шару напірного трубопроводу. Дослідженнями турбулентності руслових потоків переймалися багато вітчизняних і зарубіжних вчених. Суттєві вклади у розвиток теоретичного обґрунтування турбулентності водотоків належать А.Н. Колмогорову [6], Б.А. Фідману [7], І.К. Нікітіну[8], А. Б. Клавену [9], В.С. Боровкову [10] та іншим вченим.

Товщина пристінного шару δ_n орієнтовно дорівнює подвоєній абсолютній висоті виступів шорсткості стінки труби $\approx 2\Delta_{сер.зв}$. Цей шар перебуває під впливом гідродинамічного тиску водних мас по глибині потоку, який для напірного трубопроводу визначається орієнтовно радіусом труби. Чим більший радіус (глибина потоку), тим вищий рівень активності явища турбулентності водних мас у пристінному шарі. В самому потоці, при зміні рівня турбулентності водних мас (рівня генерації мікрівирів – елементів турбулентності), відбувається структурна перебудова субстанції, що характеризує рівень формування центрального мезовира.

Для вирішення поставленої задачі взято два із наведених вище основних рівнянь

$$* \frac{\partial \vec{v}'}{\partial t} = -(\vec{v}' \cdot \nabla) \vec{v}' + \nu \Delta \vec{v}' - \frac{1}{\rho} \nabla p + \zeta_{\Delta} \delta_{\Delta i} \nabla \text{div} h; \quad (63)$$

$$* \frac{\partial \vec{v}'}{\partial t} = -(\vec{v}' \nabla) \vec{v}' - \frac{1}{\rho'} \nabla p \quad (64)$$

Розкриті разом рівняння (63) і (64) у двовимірному просторі мають наступний вигляд:

$$\frac{\partial U'_x}{\partial t} = -U'_x \frac{\partial U'_x}{\partial x} - U'_y \frac{\partial U'_x}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\nu \left(\frac{\partial U'_x}{\partial x} + \frac{\partial U'_y}{\partial x} - \frac{2}{3} \delta_{x,\Delta} \frac{\partial U'_x}{\partial x} \right) \right] - \frac{1}{\rho'} \frac{\partial p_x}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\zeta_{\Delta} \delta_{\Delta,x} \frac{\partial h}{\partial x} \right) +$$

$$+ \frac{\partial U'_x}{\partial t} + U'_x \frac{\partial U'_x}{\partial x} + U'_y \frac{\partial U'_x}{\partial y} + \frac{1}{\rho'} \frac{\partial p_x}{\partial x}$$

$$\frac{\partial U'_y}{\partial t} = -U'_x \frac{\partial U'_y}{\partial x} - U'_y \frac{\partial U'_y}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left[\nu \left(\frac{\partial U'_y}{\partial y} + \frac{\partial U'_z}{\partial y} - \frac{2}{3} \delta_{y,\Delta} \frac{\partial U'_y}{\partial y} \right) \right] - \frac{1}{\rho'} \frac{\partial p_y}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\zeta_{\Delta} \delta_{\Delta,y} \frac{\partial h}{\partial y} \right) +$$

$$+ \frac{\partial U'_y}{\partial t} + U'_x \frac{\partial U'_y}{\partial x} + U'_y \frac{\partial U'_y}{\partial y} + \frac{1}{\rho'} \frac{\partial p_y}{\partial y}$$

Рівняння (64) включено у дану систему з метою стабілізації рівня турбулентності у пристінному шарі, який залежить від зміни тиску. Після відповідних скорочень отримуємо наступні рівняння:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\nu \left(\frac{\partial U'_x}{\partial x} + \frac{\partial U'_y}{\partial x} - \frac{2}{3} \delta_{\Delta,x} \frac{\partial U'_x}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[\zeta_{\Delta} \delta_{\Delta,x} \frac{\partial h}{\partial x} \right] = 0;$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left[\nu \left(\frac{\partial U'_y}{\partial y} + \frac{\partial U'_z}{\partial y} - \frac{2}{3} \delta_{\Delta,y} \frac{\partial U'_y}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\zeta_{\Delta} \delta_{\Delta,y} \frac{\partial h}{\partial y} \right] = 0.$$

Отримані рівняння являють собою однорідну стаціонарну систему.

Після диференціювання і інтегрування даних рівнянь, при граничних умовах від 0 до $U'_{\Delta 0,p}$ і від 0 до $h_{\Delta,p}$ отримуємо наступні вирази:

$$-0,333 \nu U'^3_{\Delta,x,\Delta,p} + 0,222 \nu \delta_{\Delta,x} U'^3_{\Delta,x,\Delta,p} - 0,333 \zeta_{\Delta} \delta_{\Delta,x} h^3_{\Delta,x,\Delta,p} = 0;$$

$$-0,333 \nu U'^3_{\Delta,y,\Delta,p} + 0,222 \nu \delta_{\Delta,y} U'^3_{\Delta,y,\Delta,p} - 0,333 \zeta_{\Delta} \delta_{\Delta,y} h^3_{\Delta,y,\Delta,p} = 0.$$

З цих виразів отримані наступні розрахункові формули для визначення величин пульсації потоку у пристінному шарі по координатах x , і y

$$U'_{\Delta,x,\Delta,p} = \left(\frac{0,333 \zeta_{\Delta} \delta_{\Delta,x} h^3_{\Delta,p}}{0,222 \nu \delta_{\Delta,x} - 0,333 \nu} \right)^{0,333};$$

$$U'_{\Delta,y,\Delta,p} = \left(\frac{0,333 \zeta_{\Delta} \delta_{\Delta,y} h^3_{\Delta,p}}{0,222 \nu \delta_{\Delta,y} - 0,333 \nu} \right)^{0,333},$$

де $\zeta_{\Delta} = \zeta_s + 0,5\nu = 2\pi h + \mu + 0,5\nu$ – загальна в'язкість субстанції у пристінному шарі потоку; $\delta_{\Delta,x} = \delta_{\Delta,y}$ – товщина пристінного шару по координатах x і y , яку рекомендується назначати домірною подвоєній висоті виступів абсолютної шорсткості стінки трубопроводу $2A_{сер.зв}$.

Для визначення компонент тиску у придонній області використовуємо рівняння (63), яке наведене у розкритому вигляді

$$* \frac{\partial U'_x}{\partial t} = -U'_x \frac{\partial U'_x}{\partial x} - U'_y \frac{\partial U'_x}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\nu \left(\frac{\partial U'_x}{\partial x} + \frac{\partial U'_y}{\partial x} - \frac{2}{3} \delta_{x,\Delta} \frac{\partial U'_x}{\partial x} \right) \right] - \frac{1}{\rho'} \frac{\partial p_x}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\zeta_{\Delta} \delta_{\Delta,x} \frac{\partial h}{\partial x} \right);$$

$$* \frac{\partial U'_y}{\partial t} = -U'_x \frac{\partial U'_y}{\partial x} - U'_y \frac{\partial U'_y}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left[v \left(\frac{\partial U'_y}{\partial y} + \frac{\partial U'_z}{\partial y} - \frac{2}{3} \delta_{y,\Delta} \frac{\partial U'_y}{\partial y} \right) \right] - \frac{1}{\rho'} \frac{\partial p_y}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\zeta_{\Delta} \delta_{\Delta,y} \frac{\partial h}{\partial y} \right), \quad (72)$$

які після диференціювання і інтегрування при граничних умовах від 0 до $U'_{\partial,p}$, $0/p_{\partial,p}$ і від 0 до $\Delta h_{\partial,p}$ та при початковій умові збереження стану динамічної рівноваги системи $\partial U'/\partial t = 0$ дають можливість отримати вирази

$$U'^2_{\Delta,x,\partial,p} - 0,333 \cdot \nu U'^3_{\Delta,x,\partial,p} + 0,222 \cdot \nu \delta_{x,\Delta} U'^3_{\Delta,x,\partial,p} + (1/\rho') p_{x,\partial,p} - 0,333 \cdot \zeta_{\Delta} \delta_{x,\Delta} h^3_{\partial,p} = 0;$$

$$U'^2_{\Delta,y,\partial,p} - 0,333 \cdot \nu U'^3_{\Delta,y,\partial,p} + 0,222 \cdot \nu \delta_{x,y} U'^3_{\Delta,x,\partial,p} + (1/\rho') p_{y,\partial,p} - 0,333 \cdot \zeta_{\Delta} \delta_{y,\Delta} h^3_{\partial,p} = 0,$$

з яких отримуємо розрахункові формули

$$p_{\Delta,x,\partial,p} = (0,333 \cdot \nu U'^3_{\Delta,x,\partial,p} - U'^2_{\Delta,x,\partial,p} - 0,222 \cdot \nu \delta_{x,\Delta} U'^3_{\Delta,x,\partial,p} + 0,333 \cdot \zeta_{\Delta} \delta_{x,\Delta} h^3_{\partial,p}) \rho; \quad (73)$$

$$p_{\Delta,y,\partial,p} = (0,333 \cdot \nu U'^3_{\Delta,y,\partial,p} - U'^2_{\Delta,y,\partial,p} - 0,222 \cdot \nu \delta_{y,\Delta} U'^3_{\Delta,y,\partial,p} + 0,333 \cdot \zeta_{\Delta} \delta_{y,\Delta} h^3_{\partial,p}) \rho. \quad (74)$$

Висновки

На основі вищевикладеного матеріалу можна зробити наступні науково-методичні узагальнення:

1. Отримані результати розрахунків характеристик напірного потоку дають можливість стверджувати про наявність в центрі труби стійкого ядра.
2. Ядро потоку являє собою центральну частину мезовира, який обертається проти годинникової стрілки і, таким чином, підтримує у поперечному вимірі динамічну рівновагу системи «напірний потік – стояча хвиля».
3. Матеріали дослідження показують, що існуючий емпіричний метод гідравлічного розрахунку напірного трубопроводу цілком відповідає практиці.
4. Розв'язування замкненої системи рівнянь Нав'є-Стокса дозволяє у повній мірі оцінити гідроморфодинамічний стан водотоку при динамічній рівновазі системи «стояча хвиля-напірний потік».
5. Наведені вище аналітичні розв'язання ряду задач підтверджують можливість широкого використання цієї системи рівнянь для вирішення цілого ряду задач гідроаеромеханіки й інших сумісних дисциплін.

Список використаної літератури

1. Седов Л.И. Механика сплошной среды. - М. Наука, 1983.- 528с.
2. Дмитриевский В.И. Гидромеханика. – М.: Изд-во «Морской транспорт», 1962.- 296 с.
3. Войткунский Я.И., Фаддеев Ю.И., Федяевский К.К. Гидромеханика. Ученик. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Судостроение, 1982. – 456 с.
4. Онищук В.В. Розв'язування системи рівнянь Нав'є-Стокса для крила літака. / В кн. Сімнадцята міжнародна наукова конференція ім. акад. Михайла Кравчука, 19-20 травня, 2016 р., Київ: Матеріали конфе. Т. 1. Диференціальні та інтегральні рівняння, їх застосування. – Київ: НТТУ «КПІ», 2016. – С. 222-225.
5. Онищук В.В. Розв'язування системи рівнянь Нав'є-Стокса для оцінки динамічної рівноваги системи «потік-русло». // Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія. Наук. збірник / Гол. Редактор В.К. Хільчевський. - К.: ВГП Обрії, 2016.- Т.4(43). - С. 6-24.
6. Колмогоров А.Н. Локальная структура турбулентности в несжимаемой жидкости при очень больших числах Рейнольдса. //ДАН СССР. - Т.30. - №4, 1941. – С. 13-17.
7. Фидман Б.А. Об уравнениях гидромеханики для многокомпонентной турбулентной среды. Изд. СО АН СССР, ОТН, №2, вып.1, 1965. – С. 24-29.
8. Никитин И.К. Турбулентный русловой поток и процессы в придонной области. - Киев: Изд-во АН УССР, 1968. – 120 с.
9. Клавен А.Б. Исследование структуры турбулентного потока. //Тр. ГГИ, 1986. – Вып.136. – С. 65-76.

10. Боровков В.С. Руслловые процессы и динамика речных наносов на урбанизованных территориях /В.С. Боровков. - Л.: Гидрометеоздат, 1989. – 286 с.

11. Патент України на корисну модель № 103796. Модернізована високоєкологічна мала гідроелектростанція (ГЕС). Онишук В.В., Ободовський О.Г., Нікулін Д.О., Ободовський Ю.О. Бюл. № 24, 2015.

V. Onischuk, Cand. Sc. (Eng.), SRF, ORCID 0000-0003-3406-8778
Shevchenko National University of Kyiv

THE THEORETICAL JUSTIFICATION BANDWIDTH PRESSURE PIPE BASED SOLUTION OF THE EQUATION NAVYE –STOKSA

Based on the analytical solution of closed system of Navier-Stokes equations the estimation hydromorphological pressure flow state in the dynamic equilibrium system "standing wave - wave deformation." According to the calculation, formula assessed a specific example of the structure of the pressure flow. The core flow is a neutral zone as mezovyra that rotates clockwise and thus supports the transverse dimension of dynamic equilibrium system "pressure flow - standing wave." Established that the hydrodynamic pressure substance layer in the wall close to the high vacuum, and it indicates a neutral layer between a stream and a solid wall. The results of the research show that the existing empirical method of calculating the hydraulic pressure pipe is consistent practice. Solinoidalnyy movement of substances in the pressure pipe is a clear proof of principle of minimum energy dissipation in an open system. This movement is due to the action of three substances of mass forces - hydrodynamic pressure, standing wave in conditions of slow flow and transverse thrust against the background of a blocked meandering manifestation of the phenomenon. With the onset of the stationary hydraulic mode standing wave energy is transformed into a longitudinal cross-circulation, ie solinoidalnyy movement.

Keywords: hydrodynamic system "standing wave - wave of deformation", dynamic equilibrium of the system, solinoid trajectory of the motion of matter, Navier - Stokes equation system, core of the watercourse.

References

1. Sedov L.I. Mechanics sploshnoy environment. - M. Nauka, 1983.- 528 p.
2. Dmytrevskyy V.I. Fluid mechanics. - M.: Publishing House "Morskoy transport", 1962.- 296 p.
3. Voytkunskyy Y.I., Faddeev J.I., Fedyayevskyy K.K. Fluid mechanics. Pupil. - the second ultrasound., Rev. and add. - L.: Sudostroenye, 1982. - 456 p.
4. Onischuk V. Solving the system of Navier-Stokes equations for estimation of dynamic equilibrium system "flow-channel." // Hydrology, hydrochemistry and hydroecology. Science. collection / Gl. Editor VK Khilchevsky. - K.: VGP Horizons, 2016.- V.4 (43). - P. 6-24.
5. Onischuk V. Solving the system of Navier-Stokes equations for airplane wing. I / Vol. Seventeenth International Conference named. Acad. Kravchuk, May 19-20, 2016, Kyiv: Proceedings of the conference. T. 1. Differential and integral equations and their applications. - Kyiv: National Technical University "KPI", 2016. - P. 222-225.
6. Kolmogorov A.N. Lokalnaya structure of turbulence in an incompressible fluid with large-Very Reynolds. // DAN USSR. - T.30. - №4, 1941. - P. 13-17.
7. Fydman B.A. Rev. equation for fluid mechanics mnogokomponentnoy turbulentnoy environment. Ed. SO AN USSR, relative, №2, вып.1, 1965. - P. 24-29.
8. Nikitin I.K. Turbulentnyy ruslovooy flow and processes in prydonnoy area. - Kiev: Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1968. - 120 p.
9. Klaven A.B. Investigation of turbulent flow structure. // Tr. ННУ, 1986. - Вып.136. - P. 65-76.
10. Borovkov V.S. Ruslovye processes and dynamics rechnykh nanosov in the territories urbanezovannykh /V.S. Borovkov. - L.: Gidrometeoizdat, 1989. - 286 p.
11. Ukraine patent for utility model number 103796. The upgraded vysokoeekolohichna small hydroelectric power plant (HPP). Onischuk V.V., Obodovskyy A.G., Nikulin D.O., J.O. Obodovskyy Bull. Number 24, 2015.

УДК 532.551

В.В. Онищук, канд. техн. наук, старш. науч. сотруд., **ORCID 0000-0003-3406-8778**
Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ НАПОРНОГО ТРУБОПРОВОДА НА ОСНОВЕ РЕШЕНИЯ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ НАВЕ – СТОКСА

На основе аналитического решения замкнутой системы уравнений Навье-Стокса выполнена оценка гидроморфологического состояния напорного потока при динамическом равновесии системы «стоячая волна - волна деформации». По полученным расчетным формулам на конкретном примере оценена структура напорного потока. Солиноидальное движение субстанции в напорном трубопроводе является ярким подтверждением принципа минимума диссипации энергии в открытой системе. Это движение субстанции обусловлено действием трех массовых сил - гидродинамического напора, стоячей волны в условиях замедленного течения и поперечным распором на фоне заблокированного проявления явления меандрирования. Полученные результаты расчетов характеристик напорного потока дают возможность утверждать о наличии в центре трубы устойчивого ядра. Ядро потока представляет собой центральную часть мезовира, который вращается против часовой стрелки и, таким образом, поддерживает в поперечном измерении динамическое равновесие системы «напорный поток - стоячая волна».

Ключевые слова: гидродинамическая система «стоячая волна - волна деформации», динамическое равновесие системы, солиноидальная траектория движения субстанции, система уравнений Навье - Стокса, ядро водотока.

Надійшла 29.06.2017

Received 29.06.2017

УДК 331.45

О.Г. Левченко, д-р техн. наук, проф., **ORCID 0000-0002-9737-7212**

О.С. Ильчук, асист., **ORCID 0000-0001-6352-5320**

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

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ОЦІНЮВАННЯ РІВНЯ ЕФЕКТИВНОСТІ УПРАВЛІННЯ ОХОРОНОЮ ПРАЦІ В ГАЛУЗІ МАШИНОБУДУВАННЯ

У роботі обґрунтовано застосування правила ранжування для машинобудівних виробництв за показниками впливу на рівень їх виробничого травматизму. Сформульовано математичну постановку задачі ранжування. Розраховано й впорядковано суму рангів для виробництв в галузі машинобудування. Виконано математичне моделювання ранжування виробництв за допомогою правила Борда та отримано матрицю спостережень. Наведено результати розподілу потерпілих за причинами нещасних випадків, які в повному обсязі відображають стан охорони праці та рівень виробничого травматизму в галузі машинобудування в цілому.

Розглянуто десять машинобудівних виробництв України та наведено результуючі значення ранжування правилом Борда для визначення кращих та гірших з них.

Ключові слова: охорона праці, ефективність управління, машинобудування, виробничий травматизм, ранжування, правило Борда.

© О.Г. Левченко, О.С. Ильчук, 2017

Вступ. Ранжування соціально-економічних об'єктів будь-якої природи – складна проблема теорії прийняття рішень і теорії колективного вибору. Дослідженню даної проблеми присвячена велика кількість літератури [1]. Зупинимося на окремих найбільш повних правилах ранжування. Такі правила застосовуються під час оцінки рейтингів наукових проектів [2], тендерів [3], держав [4] тощо.

У процесі обробки й аналізу інформації стану рівня виробничого травматизму в галузі машинобудування скористаємося правилами ранжування. Для кожного виробництва вираховуємо суму рангів, потім впорядковуємо цю суму. Ранг один дають виробництву, яке отримало найменшу суму, найвищий ранг — виробництву з найвищою сумою. Сформулюємо математичну постановку задачі ранжування.

Нехай досліджувана система складається зі скінченної множини Π_0 виробництв Π_i , $\Pi_0 = \{ \Pi_i \mid i = \overline{1, m} \}$ [5]. Кожне виробництво $\Pi_i \in \Pi_0$ характеризує скінченна множина Π_0 показників Π_i . Зі сформованої групи показників E_0 для ранжування використовують найважливіші, на думку експертів показники E_k , $E_0 = \{ E_k \mid k = \overline{1, l} \}$. Кожний показник $E_k \in E_0$ піддається аналізу по відношенню до всіх виробництв.

В теорії ранжування популярним методом є правило французького математика Борда. Упорядкування, отримане цим методом, узагальнює думки всіх експертів, враховуючи думку більшості.

Метою дослідження є оцінювання рівня ефективності управління охороною праці на десяти машинобудівних виробництвах шляхом використання правила Борда.

Матеріал і результати дослідження. Модель ранжування виробництв за допомогою правила Борда має наступну структуру. По кожному j -му показнику i -го машинобудівного виробництва x_{ij} упорядковуємо всі виробництва від кращого до гіршого з точки зору ефективності управління охороною праці. За останнє місце i виробництво отримує 0 балів, один бал за передостаннє і так далі, за перше місце i виробництво отримує $i-1$ бал. Згодом підраховуються бали, які отримані по кожному показнику. В загальному рейтингу на перше місце ставиться i виробництво з найбільшою сумою балів і т. ін.

Алгоритм правила Борда включає в себе наступну послідовність дій [6].

На початку формуємо матрицю спостережень. Вихідна множина складається з m елементів, описаних n ознаками; кожна її одиницю можна інтерпретувати як точку n -мірного простору з координатами, що дорівнюють значенням n ознак для виробництва, яке розглядається. Матриця спостережень має наступний вигляд:

$$X = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1k} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2k} & \dots & x_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{i1} & x_{i2} & \dots & x_{ik} & \dots & x_{in} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mk} & \dots & x_{mn} \end{pmatrix} \quad (1)$$

де m – кількість виробництв; n – кількість показників для оцінювання; x_{ik} – значення показника k для i -го виробництва.

В якості критеріїв для ранжування використовуємо показники, які розглядалися у таблиці 1, отримані в Національному науково-дослідному інституті промислової безпеки та охорони праці.

Таблиця 1 – Розподіл потерпілих за причинами нещасних випадків

Код	Причини нещасного випадку	Питома вага, %
1	2	3
24.2	Невиконання вимог інструкцій з охорони праці	15,5
06.0 06.1 06.2 06.3	Незадовільний технічний стан	14,5

Продовження табл.1

24.1	Невиконання посадових обов'язків	8,5
21.0	Порушення правил безпеки руху	7,4
19.0	Порушення вимог безпеки під час експлуатації устаткування, машин, механізмів тощо	7
18.0	Порушення технологічного процесу	6,9
32.0	Особиста необережність потерпілого	4,8
31.0	Травмування внаслідок протиправних дій інших осіб	4,4
08.0	Інші технічні причини	3,9
07.0	Незадовільний стан виробничого середовища	3,2
05.0	Недосконалість, невідповідність вимогам безпеки технологічного процесу	3,2
01.0	Конструктивні недоліки, недосконалість, недостатня надійність засобів виробництва	2,6
20.0	Порушення вимог безпеки під час експлуатації транспортних засобів	2,5
24.0	Порушення трудової і виробничої дисципліни	2,1
22.0	Незастосування засобів індивідуального захисту (за їх наявності)	1,9
04.0	Неякісне виконання будівельних робіт	1,6
29.0	Незадовільні фізичні данні або стан здоров'я	1,4
17.0	Залучення до роботи працівників не за спеціальністю (професією)	1,4
25.0	Інші організаційні причини	1,2
03.0	Неякісна розробка або відсутність проектної документації на будівництво, реконструкцію виробничих об'єктів, будівель, споруд, обладнання тощо	1,1
33.0	Інші психофізичні причини	0,9
10.1	Відсутність або неякісне проведення інструктажу	0,7
11.0	Неякісна розробка, недосконалість інструкцій з охорони праці або їх відсутність	0,5
02.0	Конструктивні недоліки, недосконалість, недостатня надійність транспортних засобів	0,5
27.0	Алкогольне, наркотичне, токсикологічне сп'яніння	0,5
09.0	Незадовільне функціонування, недосконалість або відсутність системи управління охороною праці	0,4
10.2	Допуск до роботи без навчання та перевірки знань з охорони праці	0,4
14.0	Відсутність або неякісне проведення медичного обстеження (профвідбору)	0,4
13.0	Порушення режиму праці та відпочинку	0,2
15.0	Невикористання засобів індивідуального захисту через незабезпеченість ними	0,2
26.0	Алкогольне, наркотичне, токсикологічне отруєння	0,2

Ці показники були сформовані, враховуючи основні складові організаційно-технічного спрямування, які в повному обсязі відображають стан охорони праці та рівень виробничого травматизму в галузі машинобудування вцілому.

До цих показників також додамо

k_1 – ранг виробництва залежно від кількості травмованих;

k_2 – ранг виробництва залежно від кількості працюючих на ньому.

Присвоюємо

$$k_{1i} = \begin{cases} k_{1-i}, & \text{якщо } T_i = T_{i-1} \\ k_{1-i} + 1, & \text{якщо } T_i < T_{i-1}. \end{cases} \quad (2)$$

Показник $k_1 = 0$ у виробництва, на якому найбільша кількість випадків виробничого травматизму, найвищий ранг — виробництву з найменшим значенням.

Показник $k_2 = 0$ у виробництва, на якому найменша кількість працівників, найвищий ранг — виробництву з найбільшою кількістю працівників.

Враховуючи, що певні причини травматизму по всіх об'єктах, що підлягають аналізу відсутні, то в наступних розрахунках ними можна знехтувати.

Кожне виробництво оцінюємо з використанням коефіцієнта Борда [7]. Для кожного показника виробничого травматизму коефіцієнт Борда визначаємо за формулою

$$B(\Pi_i) = \left| \left\{ \Pi_k : \Pi_i > \Pi_k, \Pi_k \in \{\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_m\} \right\} \right|, \quad (3)$$

тобто, для кожного j -го показника домінант Π_i по кількості Π . З коефіцієнтів, які визначаємо по кожному показнику, розраховуємо результуючий коефіцієнт $B(\Pi_i)$ для кожного Π_i :

$$B(\Pi_i) = \sum_{j=1}^n \rho_j B_j(\Pi_i), \quad i = \overline{1, m}, \quad (4)$$

де ρ_j – ступінь важливості критеріїв, який визначається нормалізованими значеннями, тобто

$$\sum_{j=1}^n \rho_j = 1, \quad \rho_j \geq 0, \quad j = \overline{1, n}. \quad (5)$$

У таблиці 1 ступінь важливості критеріїв наведено у відсотках.

$$\rho_j = \frac{NT_{rj}}{\sum_{j=1}^n NP_{rj}}, \quad (6)$$

де NT_{rj} – кількість травмованих на j -му машинобудівному виробництві;

NP_{rj} – загальна кількість працівників на j -му машинобудівному виробництві.

За допомогою коефіцієнта Борда $B(\Pi_i)$ машинобудівні виробництва впорядковують за ступенем переважання.

Для прикладу розглянемо 10 машинобудівних виробництв:

Y1 – Волочиський машинобудівний завод ПАТ "Мотор Січ";

Y2 – ОП "Макіївський ремонтно-механічний завод" ГП "Макіїввугілля";

Y3 – ПАО "Новокраматорський машинобудівний завод";

Y4 – ПАТ "Крюківський вагонобудівний завод";

Y5 – ПАТ "Роменський завод "Тракторзапчастина";

Y6 – ТОВ "НВК "Технопром";

Y7 – ДП "Антонов";

Y8 – ДП "Завод ім. Малишева";

Y9 – ТОВ "Південний завод гідравлических машин";

Y10 – ПАТ "Дніпровагонмаш".

Якщо розглядати питання визначення найкращого виробництва Π^* (табл. 2), то його вибираємо, виходячи з умови

$$B(I^*) = \max_i B(I_i). \quad (7)$$

Таблиця 2 – Значення результуючих коефіцієнтів Борда

Машинобудівне виробництво	Ранжування виробництв (коефіцієнти Борда)
Y1	138
Y2	122
Y3	67
Y4	127
Y5	60
Y6	76
Y7	95
Y8	116
Y9	88
Y10	109

Результуючі значення ранжування правилом Борда для визначення кращих та гірших з них, для кожної групи, наведено в таблиці 3.

Таблиця 3 – Результуючі значення ранжування правилом Борда

№ п/п	Розподіл за рівнем ефективності охорони праці виробництв у галузі машинобудування
1	Волочиський машинобудівний завод ПАТ "Мотор Січ"
2	ПАТ "Крюківський вагонобудівний завод"
3	ОП "Макіївський ремонтно-механічний завод" ГП "Макіїввугілля"
4	ДП "Завод ім. Малишева"
5	ПАТ "Дніпровагонмаш"
6	ДП "Антонов"
7	ТОВ "Південний завод гідравлических машин"
8	ТОВ "НБК "Технопром"
9	ПАО "Новокраматорський машинобудівний завод"
10	ПАТ "Роменський завод "Тракторозапчастина"

Ранжування правилом Борда показало, що рівень ефективності управління охороною праці на Волочиському машинобудівному заводі ПАТ "Мотор Січ" є найвищий.

Висновки

1. Однією з базових функцій управління охороною праці є аналіз. Використання методів аналізу дозволяє вирішити задачу ранжування заходів за критеріями виконання вимог охорони праці.

2. Аналіз показників, що впливають на управління охороною праці в галузі машинобудування з використанням правила ранжування Борда, дозволяє здійснити оцінювання рівня виробничого травматизму, провести аналіз подальших дій в галузі охорони праці, враховуючи визначений рівень виробничого травматизму на кожному машинобудівному виробництві. Використання цього правила є простим для алгоритмізації та має достатню стійкість результатів під час оцінювання вхідних даних та проведення розрахунків. Рівень адекватності отриманих розрахунків за цим правилом залежить від наявних обсягів початкових даних.

Список використаної літератури

1. Мулен Э. Корпоративное принятие решений: аксиомы и модели. – М.: Мир, 1991. – 306 с.
2. Ковалев М.М. Новые инновационные структуры. Вестник БГЭУ. – 1995. – №1. – С. 54-69.
3. Ковалев М.М. Экспертная система анализа тендерных предложений компьютерного оборудования и софтвера. Информатизация адукации. – 1997. – №1. – С. 68-92.
4. Горбач А.В., Ковалев М.М. Как определяются международные рейтинги государств // Вестн. асоц. бел. банков. – 2000. – №33. – С. 25–28.
5. Методика визначення рейтингів університетів України. – Київ, Україна: НТУУ «КПІ», 2006. – 46с.
6. Підвищення ефективності енерговикористання на об'єктах систем тепlopостачання. Електронний ресурс] – Режим доступу: http://knowledge.allbest.ru/physics/2c0a65635b2bd69a5c53b88521216c37_1.html.

7. Нуреев Р.М. Теория общественного выбора: Курс лекций. – Москва, Россия.: Изд. дом ГУ ВШЭ, 2005.

O. Levchenko, Dr. Eng. Sc., Prof. ORCID 0000-0002-9737-7212
O. Ilchuk, TF, ORCID 0000-0001-6352-5320

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
MATHEMATICAL MODELING OF EVALUATION PROCESS OF THE EFFICIENCY LEVEL OF
LABOR PROTECTION MANAGEMENT IN MACHINE PRODUCTION INDUSTRY

This work presents the application of the rules of ranking for machine-building enterprises by the indicators of influence on the level of the productional injuries. Prepared the mathematical formulation of the ranking process. The sum of the following ranks for machine-building enterprises is calculated and analysed. The first rank was given to the production with the lowest sum, and the highest rank - to the production with the highest sum. The mathematical modelling of the ranking process was prepared with the help of the Bord's rule and fulfilled through a matrix. Results contain reasons of the accidental productional injuries. The indicators that were formed, represent the main components of the organizational and technical direction and fully reflect the state of labour protection in the field of mechanical engineering in general.

Ten Ukrainian machine-building enterprises were analysed and the obtained results determined the best and worst of them.

Keywords: labor protection, the effectiveness of management, mechanical engineering, industrial injuries, ranking, the Borda rule.

References

1. E. Mullen, *Kooperativnoe priniatie resheniy: aksiomy i modeli*. Moscow, Russia: Mir, 1991.
2. M. Kovalev, «New innovative structures», *Herald BSEU*, no. 1, pp. 54-69, 1995.
3. M. Kovalev, «Expert system for the analysis of tender offers of computer equipment and software. Informatization of aducation», *Herald BSEU*, no. 1, pp. 68-92, 1997.
4. A. Gorbach, M. Kovalev, «How international ratings of the countries are determined», *FBACS*, no. 33, pp. 25–28, 2000.
5. *Methodology of the Ukrainian universities rating determination*. Kiev, Ukraine, 2006.
6. «Increase of efficiency of energy use on objects of the Heat supply systems», 2014. [Online]. Available: http://knowledge.allbest.ru/physics/2c0a65635b2bd69a5c53b88521216c37_1.html.
7. R. Nureev, *The theory of public choice: The course of lectures*. Moscow, Russia: HSE Publishing House, 2005.

УДК 331.45

О.Г. Левченко, д-р. техн. наук, проф., ORCID 0000-0002-9737-7212
О.С. Ильчук, ассистент., ORCID 0000-0001-6352-5320

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОЦЕНКИ УРОВНЯ
ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ОХРАНОЙ ТРУДА В ОТРАСЛИ МАШИНОСТРОЕНИЯ

В работе обосновано применение правила ранжирования для машиностроительных производств по показателям влияния на уровень их производственного травматизма. Сформулирована математическая постановка задачи ранжирования. Рассчитано и упорядоченно сумму рангов для производств в отрасли машиностроения. Выполнено математическое моделирование ранжирования производств с помощью правила Борда и получена матрица наблюдений. Приведены результаты распределения пострадавших по причинам несчастных случаев, которые в полном объеме отражают состояние охраны труда и уровень производственного травматизма в отрасли машиностроения в целом. Рассмотрены десять машиностроительных производств Украины и приведены результирующие значения ранжирования правилом Борда для определения лучших и худших из них.

Ключевые слова: охрана труда, эффективность управления, машиностроение, производственный травматизм, ранжирование, правило Борда.

Надійшла 29.08.2017
Received 29.08.2017

СИСТЕМНІ ЕКОЛОГО-ЕНЕРГЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ENVIRONMENTAL AND ENERGY SYSTEM RESEARCH

УДК 504.3.054

О.Є. Кофанов

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

БАГАТОПАРАМЕТРИЧНІ МОДЕЛІ ПРОГНОЗУВАННЯ СКЛАДУ І ВЛАСТИВОСТЕЙ МОДИФІКОВАНИХ БІОКОМПОНЕНТОМ ПАЛИВНИХ СИСТЕМ

Досліджено фізико-хімічні властивості модифікованих оксигенатним біокомпонентом палив; встановлено залежності експлуатаційних і екологічних характеристик паливних композицій від біокомпоненту. Побудовано багатопараметричні математичні моделі, розроблено алгоритм і програмне забезпечення для реалізації авторської методики визначення складу, фізико-хімічних, експлуатаційних та екологічних показників модифікованих палив за даними фізико-хімічного аналізу бінарних систем. Доведено екологічну ефективність добавок оксигенатного біокомпоненту до традиційного дизельного палива завдяки досягненню зменшення димності відпрацьованих газів та скорочення викидів інших забруднюючих та небезпечних для здоров'я людини речовин.

Ключові слова: фізико-хімічні властивості, біодизель, біокомпонент, математичні моделі, екологічна ефективність.

Вступ. На сучасному етапі розвитку України екологічна безпека країни стає невід'ємною складовою її національної безпеки. Критичного рівня сягає забруднення атмосферного повітря стаціонарними і пересувними джерелами викидів, особливо – автотранспортним і автодорожнім комплексами. При роботі дизельних двигунів в атмосферне повітря викидаються оксиди Карбону, Нітрогену, Сульфуру тощо, а також тверді дисперсні частинки (в основному частинки сажі) та інші забруднювачі. Максимальна концентрація шкідливих речовин (ШР) у місті поблизу автодоріг спостерігається у так звані години "пік", а також в районах щільної забудови, у дворах-колодязях тощо. Особливо небезпечними автотранспортні викиди є для дітей та мешканців будинків, розташованих поблизу жвавих автомагістралей.

Постановка проблеми. Основною причиною викидів ШР є неповне та нерівномірне згоряння моторного палива (МП) у камері згоряння (КЗ) двигуна. На склад відпрацьованих газів (ВГ) автомобіля впливає вид та якість пального, технічний стан автотранспортного засобу (АТЗ), режим його роботи, організація дорожнього руху автомагістралями міста тощо. Зокрема, для міських транспортних потоків характерними є низькі швидкості, рух у режимі "stop-and-go", а також часті гальмування й розгони, що спричинює роботу двигунів на неусталених теплових режимах і, як наслідок, підвищення токсичності ВГ. Проте навіть за усталених режимах викиди токсичних речовин двигунами внутрішнього згоряння (ДВЗ) залишаються досить високими.

Аналіз останніх досліджень. Останніми роками багато вчених-дослідників у нашій країні та за її межами присвятили свої праці вивченню впливу автотранспорту на урбанізовані території та здоров'я людини, підвищенню його екологічності. Це, зокрема, такі вчені, як В. С. Бахарев, С. В. Бойченко, Г. О. Вайганг, С. О. Вамболь, В. В. Вамболь, А. Г. Говорун, Ю. Ф. Гутаревич, Б. М. Данилішин, О. І. Запорожець, В. С. Міщенко, Г. І. Рудько, В. О. Хрутьба, В. М. Шмандій, Р. Eastwood, V. Juric, J. Merksiz, I. A. Resitoglu та інші науковці. Процеси, що відбуваються у камері згоряння двигуна, та способи оптимізації окиснення палива досліджували А. І. Атамась, Ю. Ф. Гутаревич, В. А. Звонов, П. М. Каніло, В. М. Луканін, В. П. Матейчик, І. В. Парсаданов, Л. Д. Пляцук, С. В. Шапко, Y. Zhu тощо. Застосуванню альтернативних палив у ДВЗ присвячено роботи А. А. Александрова, А. І. Атамася, С. М. Девяніна, А. О. Корпача, В. П. Кухара, В. А. Маркова, А. П. Марченко, Н. Н. Патрахальцева, Л. К. Патриляка, Г. Л. Рябцева, В. Г. Семенова, А. І. Bangboye, M.-F. Chabrelie, J. I. Hileman, G. Knothe, D. Lome, A. Pandey, D. Rajagopal, R. W. Stratton, D. Zilberman та інших учених.

Біопаливо (БП) розглядається в Україні і світі як альтернатива традиційному нафтовому пальному [1]. В автомобільних двигунах застосовують або паливні бензинові суміші етанолу, зокрема, Е5–Е100 (для бензинових двигунів), або біодизель В2–В100 (для дизельних моторів). Літера "Е" відповідає англійському слову "Ethanol", а "В" – "Biodiesel" (цифри поряд з літерами позначають, відповідно, відсоток етанолу та біодизелю на одиницю об'єму паливної суміші [2]).

Дослідники відмічають, що існує тісний зв'язок між інтенсивністю транспортних потоків і рівнем забруднення придорожніх територій міста. Зокрема при великій концентрації АТЗ концентрація ШР на тротуарах, як правило, значно

перевищує гранично допустимі норми (ГДК). Причому вплив автодороги відчутний на відстані 1–2 км і розповсюджується на висоту до 300 і більше метрів. Шкідливий вплив токсикантів різко зростає влітку за високих температур і сонячної радіації, при температурних інверсіях тощо. Взимку при від'ємній температурі атмосферного повітря збільшується емісія ВГ та їх токсичність внаслідок необхідності прогріву холодного двигуна та через роботу АТЗ у несприятливих кліматичних умовах [4].

Отже, аналіз наукових праць дає змогу дійти висновку, що на сьогодні накопичилось багато невирішених проблем стосовно зменшення токсичного впливу з боку автотранспорту та застосування альтернативних моторних палив. Це зумовило актуальність досліджень у напрямку часткової заміни традиційного нафтового дизельного палива (ДП) на модифіковане оксигенатним біокомпонентом паливо.

Метою роботи є розробка заходів з підвищення рівня екологічної безпеки примагістральних територій міста шляхом модифікації моторного палива оксигенатним біокомпонентом (біодизелем).

Викладення основного матеріалу. У дослідженні фізико-хімічні властивості палив (густина, кінематична в'язкість, поверхневий натяг тощо), а також їх енергетичні та експлуатаційні характеристики (цетанове число (ЦЧ), дизельний індекс (ДІ), стехіометричний показник, теплота згоряння палива, період затримки його спалахування тощо) оцінювали як за стандартними методиками, так і розрахунковими методами [5–7]. Дослідження проводили на базі ГНДЛ "Реактор" ОКБ "Шторм" КПІ ім. Ігоря Сікорського. Визначали: кислотне число біодизельного (БДП) і модифікованих біокомпонентом палив; йодне число; температуру спалаху у закритому тиглі, а також фізико-хімічні характеристики досліджуваних палив – густину, кінематичну в'язкість, поверхневий натяг тощо. Усі палива перевірялись на корозійну стійкість, а також визначався вміст води, механічних домішок та ненасичених вуглеводнів, зольність тощо. Модифіковані біокомпонентом палива готували на біодизелі, одержаному в лабораторних умовах з ріпакової олії з частковим використанням відходів харчової промисловості (в основному відпрацьовані олії та фритюрні жири). Застосування такої сировини у Європі регулюється стандартом EN 14241.

Експериментально встановлено, що фізико-хімічні й експлуатаційні показники отриманого за експериментальною технологією БДП [8] відповідають вимогам вітчизняного стандарту і стандарту ЄС. Модифіковані оксигенатним біокомпонентом палива, що містять 0,5–30 % об. біодизелю, також відповідають чинному стандарту і можуть бути використані як МП без переналадження двигуна. Для доведення екологічності отриманих біопаливних композицій (об'ємна частка біодизелю $\varphi_{БДП} \leq 30\%$) проаналізуємо їх фізико-хімічні та експлуатаційні характеристики.

Розрахунки, підбір адекватних математичних моделей виконувались у спеціально розробленому програмному комплексі "STC-DV-Modeler" v 1.3; графічний матеріал виконувався з використанням програм GNUPLOT та MS Excel. Напрямок зв'язку між досліджуваними величинами визначали за співвідношенням значень змінних: якщо при зростанні значень однієї змінної інша змінна зростає, то зв'язок між величинами прямий (і навпаки). Показником напрямку зв'язку слугує також знак коефіцієнта кореляції r . Тісноту зв'язку між ознаками визначали за коефіцієнтом кореляції r за шкалою Чеддока (з урахуванням середньої похибки апроксимації).

На рис. 1 наведено залежності густини d_{20} , кінематичної в'язкості ν_{20} та поверхневого натягу σ_{20} модифікованого біокомпонентом ДП (20 °С) від складу бінарної паливної системи. Залежність густини досліджуваної бінарної системи від її складу має лінійний характер, що доводить, що густина підкоряється правилу адитивності. Апроксимаційне рівняння має вигляд:

$$d_{20} = 37,762x + 847,94 \quad (R^2 = 0,99), \quad (1)$$

де x – об'ємна частка БДП у паливній композиції.

Залежність кінематичної в'язкості бінарної паливної системи від її складу (x) має експоненціальний характер, що повністю узгоджується з літературними даними. Апроксимаційне рівняння у напівлогарифмічних координатах має вигляд:

$$\lg \nu_{20} = 0,0947x + 0,8141 \quad (R^2 = 0,99). \quad (2)$$

Для коректної інтерпретації даних щодо в'язкості досліджуваної паливної системи та врахування зміни густини палива зі складом системи розраховано абсолютну (динамічну) в'язкість палив η_{20} , а також їх відносну $\eta_{20}/\eta_{ДП}$ і питому (скореговану на в'язкість чистого ДП) $(\eta_{20} - \eta_{ДП})/\eta_{ДП}$ в'язкості. Останні два показники дають змогу врахувати в'язкість 100 %-го дизельного палива і тим самим дослідити зміну в'язкості внаслідок модифікування палива оксигенатним біокомпонентом. Рівняння, що моделюють ці залежності, мають експоненціальний характер і досить високий коефіцієнт детермінації.

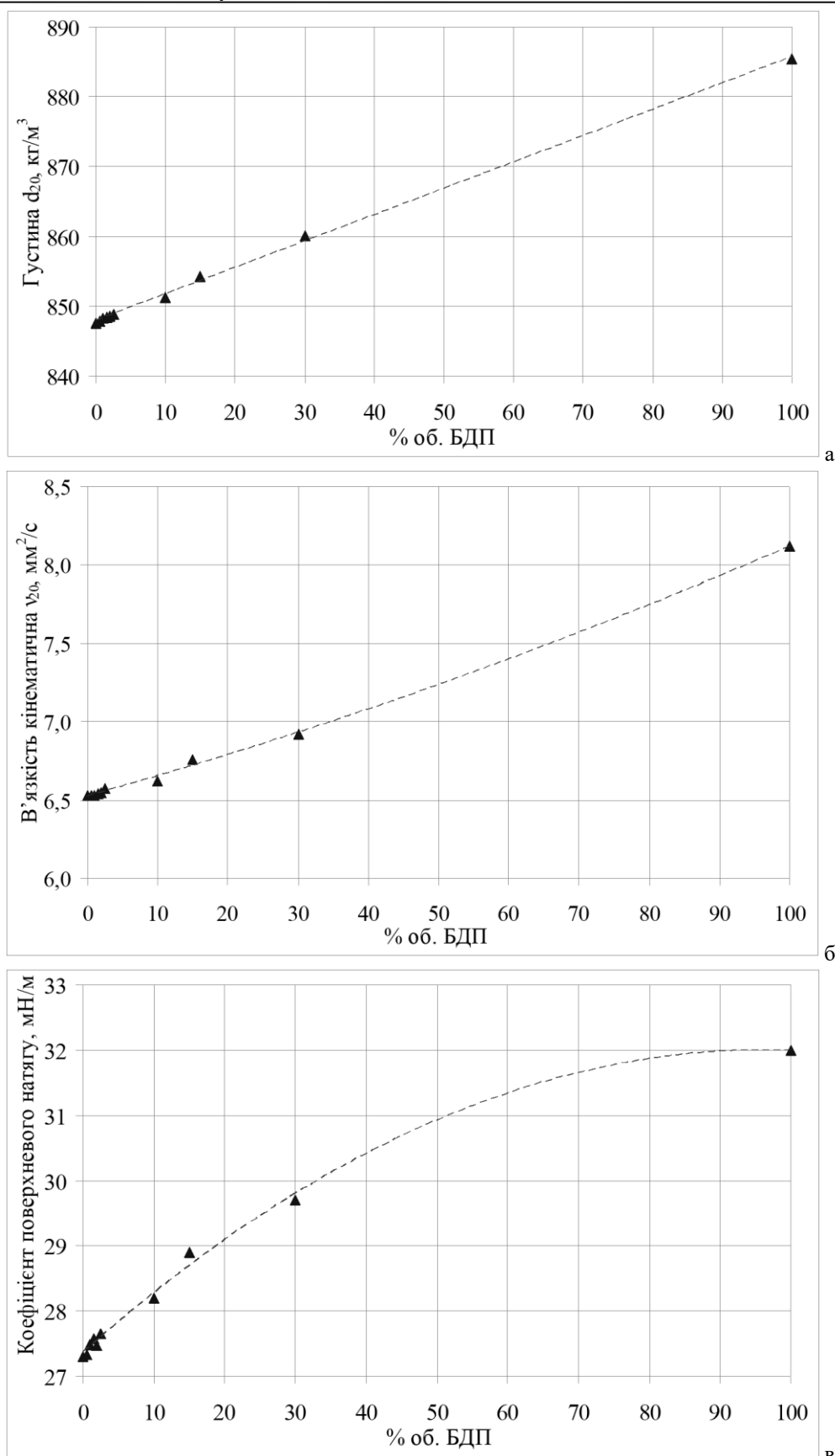


Рисунок 1 – Залежності: а) густини d_{20} , б) кінематичної в'язкості ν_{20} і в) поверхневого натягу σ_{20} палива (20 °С) від складу паливної композиції.

Кінематична в'язкість чистого БДП у діапазоні температур 20÷40 °С перевищує в'язкість традиційного ДП приблизно у 1,2–1,5 рази. Зокрема, при температурі 40 °С (регламентується стандартом EN 14214-2003) в'язкість БДП становить 4,89 мм²/с, а в'язкість традиційного ДП при тій самій температурі – 4,01 мм²/с. Однак така різниця у значеннях в'язкості не є перешкодою для використання навіть 100 %-го біодизельного палива, тоді як для модифікованих оксигенатним біокомпонентом палив (об'ємна частка біодизеля $\varphi_{БДП} \leq 30\%$) різниця у показниках набагато менша.

Коефіцієнт поверхневого натягу σ визначає здатність струї палива диспергуватися на краплини і відриватися від поверхні. Визначений при 20 °С поверхневий натяг чистого БДП $\sigma_{БДП}$ виявляється дещо більшим за поверхневий натяг традиційного нафтового ДП $\sigma_{ДП}$ (рис. 1в), а для модифікованих біокомпонентом паливних композицій величини σ незначно відрізняються від $\sigma_{ДП}$. Апроксимаційне рівняння досліджуваної залежності має вигляд поліному другої степені:

$$\sigma_{20} = -4,9944x^2 + 9,6331x + 27,359 \quad (R^2 = 0,99), \quad (3)$$

де x – об'ємна частка БДП у паливній композиції.

Фракційний склад БДП і модифікованої біокомпонентом паливної композиції перевіряли за результатами газорідинної хроматографії та оцінювали за результатами його дистиляції (перегонки за атмосферного тиску). На основі експериментальних даних побудована залежність ЦЧ палива від складу бінарної системи (рис. 2). Залежність має нелінійний характер і показує закономірне збільшення ЦЧ при переході від традиційного ДП до БДП. При цьому внаслідок збільшення ЦЧ палив зменшується період затримки запалювання, що позитивно впливає на процес горіння палива – сприяє більш плавному підвищенню тиску і збільшенню швидкості окиснення палива. Як наслідок, підвищується екологічність дизеля, зменшуються обсяги викидів чадного газу, твердих частинок, а також незгорілих вуглеводнів [9]. Апроксимаційне рівняння досліджуваної залежності має вигляд:

$$\text{ЦЧ} = 10,258x^2 + 3,6737x + 51,19 \quad (R^2 = 0,99), \quad (4)$$

де x – об'ємна частка БДП у паливній композиції.

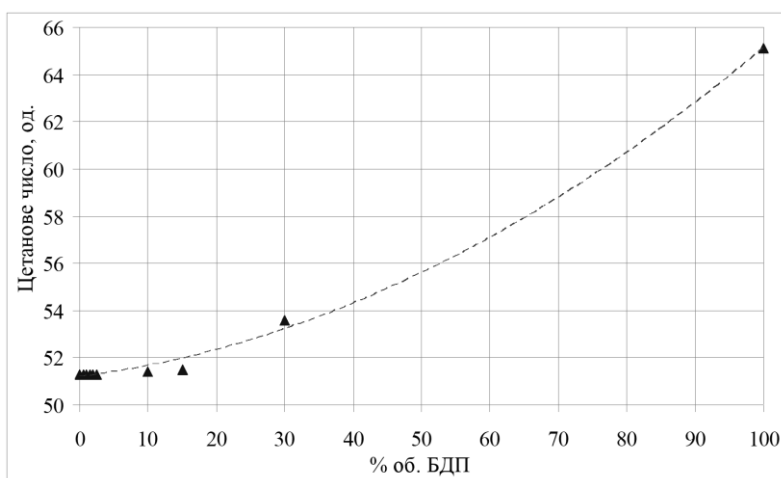


Рисунок 2 – Залежність ЦЧ від складу модифікованої біокомпонентом паливної суміші

У реальних умовах часто виникає проблема приготування паливних композицій, що містять БДП, оскільки точне дозування компонентів є складною задачею. Крім того, необхідно мати можливість швидко визначати та прогнозувати експлуатаційні й екологічні характеристики палива, модифікованого біокомпонентом. Побудуємо залежності кінематичної в'язкості (поверхневого натягу і ЦЧ) від густини модифікованої біопаливної композиції (рис. 3). У напівлогарифмічних координатах маємо лінійне апроксимаційне рівняння виду (d_{20} – густина паливної композиції, кг/м³, 20 °С):

$$\lg v_{20} = 0,0025d_{20} - 1,3095, \quad (R^2 = 0,99) \quad (5)$$

Отже, знаючи густину бінарної паливної системи (легко вимірювана характеристика), можна розрахунковим методом отримати значення в'язкості модифікованого палива (більш складна для експериментального визначення характеристика системи). За математичними регресійними моделями видно, що фізико-хімічні, експлуатаційні та екологічні показники МП мають сильний зв'язок з показником густини бінарної системи.

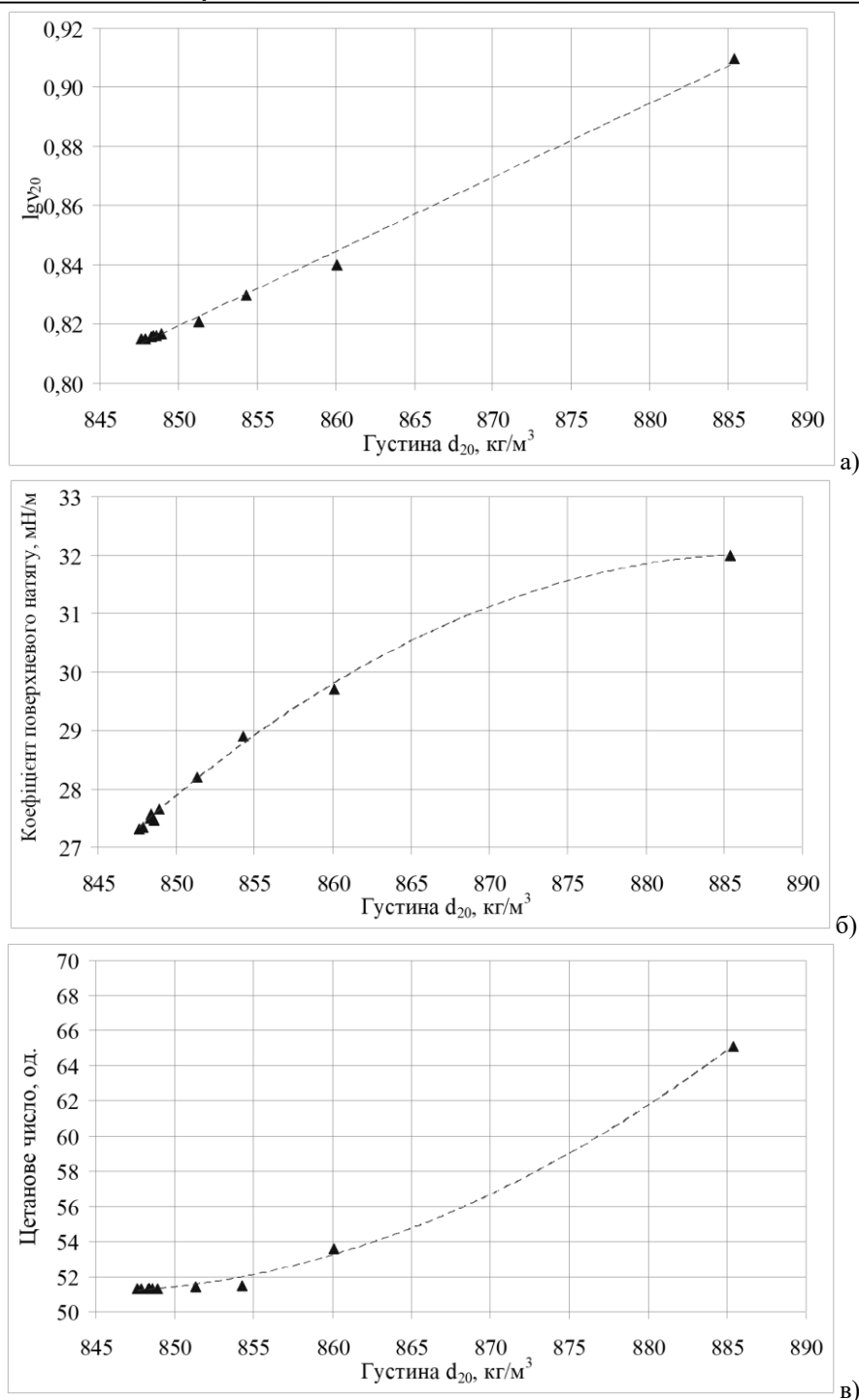


Рисунок 3 – Залежності: а) lgv_{20} , б) поверхнього натягу та в) ЦЧ бінарної паливної композиції, модифікованої біокомпонентом, від густини системи.

Нами побудовано двопараметричні денсиметрично-віскозиметричні моделі прогнозування експлуатаційних і екологічних характеристик паливної композиції, модифікованої оксигенатним біокомпонентом, а також моделі визначення цих показників за вимірюваннями густини і поверхнього натягу, густини, в'язкості та поверхнього натягу. Зокрема, залежність ЦЧ бінарної паливної системи, модифікованої біокомпонентом, від густини і десятичного логарифму кінематичної в'язкості системи (20 °C) описується лінійним модельним рівнянням з коефіцієнтом детермінації $R^2 = 0,98$:

$$\text{ЦЧ}(d_{20}; lgv_{20}) = -0,6286d_{20} + 396,01lgv_{20} + 261,34. \quad (6)$$

Графічно залежність показана на рис. 4.

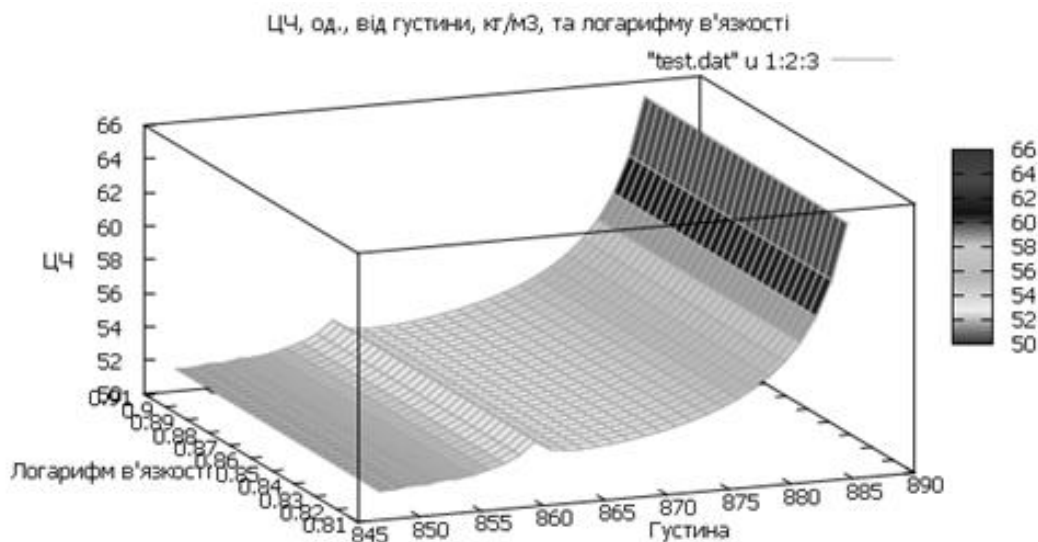


Рисунок 4 – Залежність ЦЧ бінарної паливної системи, модифікованої біокомпонентом, від густини і логарифму кінематичної в'язкості.

Для показника димності N , %, математичне рівняння має такий вигляд ($R^2 = 0,93$):

$$N(d_{20}; \lg v_{20}) = -1,7416d_{20} + 624,47\lg v_{20} + 984,92. \quad (7)$$

а досліджувана залежність показана на рис.5.

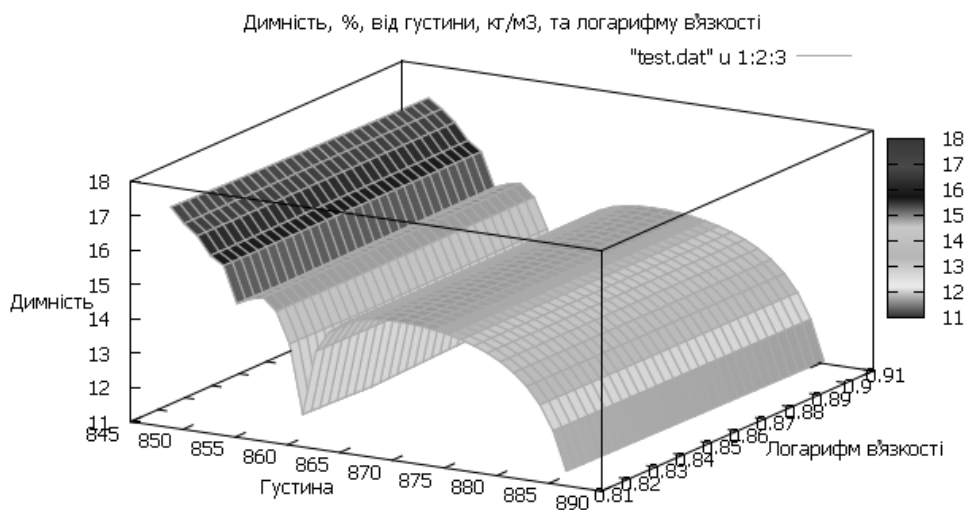


Рисунок 5 – Залежність димності ВГ, % ($n = 3500 \text{ хв}^{-1}$) від густини, $\text{кг}/\text{м}^3$, і логарифму кінематичної в'язкості бінарної паливної системи.

Висновки

Отже, дослідження показало, що заміна ДП на біодизель і паливні біокомпозиції (0,5÷30 % об. БДП) дає змогу суттєво покращити екологічні показники дизельного мотора. Застосування модифікованих біокомпонентом МП сприяє зменшенню екологічної небезпеки експлуатації дизельних двигунів за рахунок скорочення викидів чадного і вуглекислого газів (останнього – за рахунок зменшення вуглецевого числа), оксидів Сульфуру (БДП фактично не містить сполук Сульфуру) та зменшення димності тощо.

Індикаторні показники при роботі на ДП і модифікованих оксигенатами МП суттєво не відрізняються, проте питома витрата БП виявляється більшою за витрату нафтового пального, а ефективна потужність двигуна може знизитися на 7–10 % внаслідок меншої теплотворної здатності БП. Однак БП мають кращі мастильні властивості порівняно з ДП з низьким умістом Сульфуру, тому навіть незначні

його добавки позитивно вплинуть на умови експлуатації двигуна, зменшуючи рівень зношення деталей паливної апаратури. Завдяки наявності у складі біокомпоненту фосфоліпідів, які при підвищеній температурі робочого процесу здатні взаємодіяти з поверхнею металу і утворювати так звані "металеві мила", спостерігається запобігання зношенню поверхонь тертя.

Отже, використання модифікованих біокомпонентом моторних палив є не тільки екологічно доцільним, а й економічно виправданим.

Список використаної літератури

1. Кофанов А. Е. Альтернатива углеводородному топливу / А. Е. Кофанов, Д. Н. Степанов, Е. В. Кофанова, А. И. Василькевич // Тези ІХ Всеукр. наук. конф. студ., магістрів та аспірантів "Сучасні проблеми екології та геотехнологій". – Житомир : ЖДТУ, 2012. – С. 208.
2. Чупайленко О. А. Розвиток використання біопалива для автотранспорту в Україні [Електронний ресурс] / О. А. Чупайленко // Управління проектами, системний аналіз і логістика. Технічна серія. – 2014. – Вип. 13 (2). – С. 133–143. – Режим доступу : [http://nbuv.gov.ua/j-pdf/Upsal_2014_13\(2\)_16.pdf](http://nbuv.gov.ua/j-pdf/Upsal_2014_13(2)_16.pdf). – Назва з екрана.
3. Гелетуха Г. Г. Место биоэнергетики в проекте обновленной энергетической стратегии Украины до 2030 года / Г. Г. Гелетуха, Т. А. Железная [Ин-т технич. теплофизики НАН Украины] // Пром. теплотехника, 2013, т. 35, № 2. – С. 64–70.
4. Цыплакова Е. Г. Приборы и методы контроля и мониторинга воздействия автотранспорта на атмосферный воздух северных городов : дис. на соискание учен. степени доктора технич. наук : спец. 05.11.13 – приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий. – СПб, 2014. – 347 с.
5. Евдокимов А. Ю. Топлива и смазочные материалы на основе растительных и животных жиров / Евдокимов А. Ю., Фукс И. Г., Багдасаров Л. Н. – М. : ЦНИ-ИТЭИнефтехим, 1992. – № 5. – С. 7–9.
6. Бойченко С. В. Моторные топлива и масла для современной техники : монография / С. В. Бойченко, С. В. Иванов, В. Г. Бурлака. – К. : НАУ, 2005. – 216 с.
7. Хіммотологія : навч.-метод. посіб. / [С. В. Бойченко, Н. М. Кучма, В. В. Єфіменко, О. С. Тітова та ін.] – К. : Книжкове вид-во НАУ, 2006. – 156 с.
8. Ресурсосберегающая малоотходная технология производства биодизельного топлива / Е. В. Кофанова, А. И. Василькевич, А. Е. Кофанов, Д. Н. Степанов // Горная механика и машиностроение : науч.-технич. журнал. – 2015. – № 2. – С. 96–102.
9. Корпач А. О. Возможности та перспективи використання біопалива в дизелях / А. О. Корпач, О. О. Левківський // Автошляховик України. – 2009. – № 12. – С. 156–158.

O. Kofanov

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" MULTIPARAMETRIC MODELS FOR PREDICTION OF THE COMPOSITION AND PROPERTIES OF FUEL SYSTEMS MODIFIED BY BIOCOMPONENT

Today, bioenergy development and motor transport harmful emissions reduction are particularly important in the context of sustainable development of Ukraine. So, physical and chemical properties of fuels modified by biocomponent have been studied; the dependences between operational and environmental characteristics of fuel compositions and the biocomponent have been determined. Multiparametric mathematical models have been created; an algorithm and software have been developed in order to implement the author's methodology for the determining physical and chemical, operational and environmental parameters of modified fuels according to the physical and chemical analysis of binary systems.

The study has shown that the replacement of diesel with biodiesel and fuel biocompositions enables to improve the environmental performance of a diesel engine significantly. Application of the motor fuels modified by biocomponent allows to lower the environmental danger of diesel engines operation, in particular, by reducing carbon monoxide, carbon dioxide, sulfur oxides and smoke emissions.

Indicator indices for the engines working on the traditional diesel and modified motor fuels do not differ significantly, but the specific consumption of biodiesel is greater than the consumption of traditional fuels, and the effective engine power can decrease by 7–10 % due to lower calorific value of biodiesel. However, biofuel have better lubricating properties in comparison with the low Sulfur diesel fuel and thus, even minor additives will have a positive effect on the engine operating conditions, reducing the wear of the fuel equipment. Due to the presence of phospholipids in the composition of the biocomponent, which at the increased temperatures of the working process are able to interact with the metal surface and form so-called "metal soaps", the prevention of the friction surfaces wearing can be seen. Consequently, the use of the motor fuels modified by biocomponent is both environmentally and economically substantiated.

Keywords: physical and chemical properties, biodiesel, biocomponent, mathematical models, environmental efficiency.

References

- [1] A. E. Kofanov, D. N. Stepanov, E. V. Kofanova and A. I. Vasil'kevich, "Al'ternativa uglevodorodnomu toplivu [Alternative to the hydrocarbon fuel]", in *Tezi IX Vseukr. nauk. konf. stud., magistriv ta aspirantiv "Suchasni problemi ekologii ta geotekhnologii" [Theses of the IX All-Ukrainian scientific conference of students, masters and postgraduates "Modern problems of ecology and geotechnologies"]*, Zhytomyr, 2012, p. 208.
- [2] O. A. Chupaylenko, "Rozvytok vykorystannia biopalyva dlia avtotransportu v Ukraini [Development of the use of biopropellant for motor transport in Ukraine]", *Upravlinnia proektamy, systemnyi analiz i lohistyka. Tekhnichna seriia [Project management, system analysis and logistics. Technical series]*, vol. 13, no. 2, pp. 133–143, 2014.
- [3] G. G. Geletukha and T. A. Zheleznaya, "Mesto bioenergetiki v proekte obnovennoy energeticheskoy strategii Ukrainy do 2030 goda [The place of bioenergy in the project of the renewed energy strategy of Ukraine until 2030]", *Prom. teplotekhnika [Industrial heat engineering]*, vol. 35, no. 2, pp. 64–70, 2013.
- [4] E. G. Tsyplakova, "Pribory i metody kontrolya i monitoringa vozdeystviya avtotransporta na atmosferynyy vozdukh severnykh gorodov [Instruments and methods of control and monitoring the impact of vehicles on the atmosphere of northern cities]", Doctor's degree, Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego professional'nogo obrazovaniya "Natsional'nyy Mineral'no-Syr'evoy Universitet "Gornyy" [Federal State Budget Educational Institution of Higher Professional Education "National Mineral and Raw Material University "Gorny"]", 2014.
- [5] A. Yu. Evdokimov, I. G. Fuks and L. N. Bagdasarov, "Topliva i smazochnye materialy na osnove rastitel'nykh i zhivotnykh zhirov [Fuel and lubricants based on the vegetable and animal fats]", *TsNI-ITEIneftekhim*, no. 5, pp. 7–9, 1992.
- [6] S. V. Boychenko, S. V. Ivanov and V. G. Burlaka, *Motornye topliva i masla dlya sovremennoy tekhniki : monografiya [Motor fuels and oils for modern equipment: monograph]*. Kyiv: NAU, 2005, p. 216.
- [7] S. V. Boichenko, N. M. Kuchma, V. V. Yefymenko, O. S. Titova and others, *Khimotolohiia : navch.-metod. posib. [Chemmotology: a teaching manual]*. Kyiv: Knyzhkove vyd-vo NAU [Book Publishing House of NAU], 2006, p. 156.
- [8] Ye. V. Kofanova, A. I. Vasylykevich, A. Ye. Kofanov and D. N. Stepanov, "Resursosberegayushchaya malootkhodnaya tekhnologiya proizvodstva biodizel'nogo topliva [Resource-saving and low-waste biodiesel production technology]", *Gornaya mekhanika i mashinostroenie : nauch.-tekhnich. zhurnal [Mine Mechanical Engineering And Machine-Building : Scientific and Technical Journal]*, no. 2, pp. 96–102, 2015.
- [9] A. O. Korpach and O. O. Levkivskiy, "Mozhlyvosti ta perspektyvy vykorystannia biopalyva v dyzeliakh [Opportunities and perspectives of biofuel use in diesel engines]", *Avtoshliakhovyk Ukrainy [Highways of Ukraine]*, no. 12, pp. 156–158, 2009.

А.Е. Кофанов

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

МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СОСТАВА И СВОЙСТВ
МОДИФИЦИРОВАННЫХ БИОКОМПОНЕНТОМ ТОПЛИВНЫХ СИСТЕМ

Исследованы физико-химические свойства модифицированных оксигенатным биокomпонентом топлив; установлены зависимости эксплуатационных и экологических характеристик топливных композиций от биокomпонента. Построены многопараметрические математические модели, разработан алгоритм и программное обеспечение для реализации авторской методики определения физико-химических, эксплуатационных и экологических показателей модифицированных топлив по данным физико-химического анализа бинарных систем. Доказано экологическую эффективность применения добавок оксигенатного биокomпонента к традиционному дизельному топливу благодаря достижению уменьшения дымности отработавших газов и сокращения выбросов других загрязняющих и опасных для здоровья людей веществ.

Ключевые слова: физико-химические свойства, биодизель, биокomпонент, математические модели, экологическая эффективность.

Надійшла 19.12.2017

Received 19.12.2017

МОДЕЛЮВАННЯ МАСОВОЇ ТА ЛІПІДНОЇ ПРОДУКТИВНОСТІ КУЛЬТИВУВАННЯ МІКРОВОДОРОСТЕЙ В УМОВАХ КИЇВСЬКОЇ ОБЛАСТІ

У статті проаналізовано перспективи виробництва біопалива третього та четвертого поколінь. Запропоновано культивування мікробіодоростей з високим вмістом ліпідів у біомасі як сировини для цього виробництва. Розглянуто вплив інтенсивності освітлення культурального середовища на продуктивність культивування, використовуючи енергетичний баланс фотосинтезу. Запропоновано математичну модель розрахунку продуктивності культивування у відкритих ємностях залежно від інтенсивності сонячного опромінення. На основі середньомісячних рівнів сонячної радіації у місті Києві, отриманими NASA, що є усередненими на підставі 20-річних спостережень за рівнем освітленості території України, оцінено продуктивність культивування протягом року для погодних умов Київської області, використовуючи запропоновану модель. Отриману продуктивність порівняно з продуктивністю, що може бути досягнута у інших частинах світу. Для підвищення економічної ефективності виробництва біопалива запропоновано використання як культурального середовища попередньо очищених традиційними методами комунальних стічних вод. Це дасть змогу поєднати процеси вирощування сировини для біопалива і процеси очищення стічних вод від біогенних елементів.

Ключові слова: біопаливо, продуктивність культивування, ліпіди, очищення стічних вод, біогенні елементи.

Постановка проблеми. Роль біопалива як джерела енергії у суспільстві зростає з кожним днем. Розрізняють біопаливо чотирьох поколінь [1–17]. Для виробництва біопалива першого покоління як сировину використовують традиційні сільськогосподарські культури, що одночасно є сировиною для виробництва продуктів харчування. Невідворотність продовольчої кризи у майбутньому робить необхідним пошуки іншої сировини для виробництва енергоносіїв. Паливо другого покоління виробляють з сировини, що не може бути використана для харчового виробництва. Це відходи сільського господарства, відходи деревообробки, відходи харчової промисловості, а також технічні культури, що спеціально для цього вирощуються. Складнощі з переробленням відходів та невеликий вихід готового продукту, а також необхідність відведення родючих земельних площ під технічні культури також робить актуальним пошуки іншої сировини. Біопаливо третього та четвертого поколінь перспективно виробляти з біомаси водоростей. Багато з них можуть більш ефективно конвертувати сонячну енергію у біомасу ніж ґрунтові культури, зв'язуючи при цьому вуглекислий газ із атмосфери [13].

Серед водних культур найбільш цікавими можна вважати мікробіодорості. Порівняно з макроробіодоростями, цінність перших полягає перш за все у тому, що вони мають просту будову, є невибагливими, швидко ростуть та мають високий вміст олій. Біомаса різних штамів містить різну кількість білків вуглеводів та ліпідів. Проте, не дивлячись на їх значний вміст у біомасі багатьох штамів і потенційну можливість використання для різних потреб, на теперішній час дуже мало штамів знайшли комерційне застосування. Серед тих, що найбільш широко використовуються у світі можна назвати такі: *Chlorella vulgaris*, *Dunaliella salina*, *Spirulina*, *Haematococcus pluvialis* [14].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Мікробіодорості відрізняються також тим, що можуть рости у дуже різноманітних середовищах. Для них підходить як прісна вода, так і надзвичайно солоня [15]. Багато зі штамів цих організмів можуть добре пристосовуватися до нових умов, що полегшує створення технологій їх культивування. Крім того деякі штами містять значні відсотки ліпідів у сухій біомасі, що робить їх привабливими як сировину для біопалива. Зустрічаються штами зі вмістом ліпідів більше 70 %, а деякі, за певних умов культивування, можуть містити навіть більше 80 % [1]. Біохімічні методи четвертого покоління (біопаливо четвертого покоління) значною мірою пов'язані з обміном речовин під впливом мікроорганізмів, щоб виділяти біобутанол, біоетанол тощо [13]. Четверте покоління біопалив-фотобіологічних сонячних палив та електропалив, як очікується, є найбільш прогресивним і принесе фундаментальні прориви в галузі біопалива. Технологія виробництва такого сонячного біопалива є новою галуззю, заснованою на прямому перетворенні сонячної енергії в паливо з використанням невичерпної, дешевої та широко доступної сировини через культивування біомаси.

Світовий досвід свідчить [14], що біодизель, вироблений з біомаси мікродоростей, має подібні експлуатаційні властивості до традиційного біодизелю.

Проте культивування мікродоростей вимагає також певних умов навколишнього середовища, а саме не надто низьких температур та наявності достатньої кількості сонячного світла для забезпечення процесу фотосинтезу. Ці умови можна вважати обмежувачими факторами щодо продуктивності процесу культивування.

Мета статті – розробити математичну модель розрахунку продуктивності культивування мікродоростей у відкритих ємностях залежно від інтенсивності освітлення та оцінено продуктивність такого культивування протягом року для погодних умов Київської області.

Викладення основного матеріалу. Під час вирощування мікродоростей у відкритих ємностях, вони піддаються впливам різних погодних умов, перш за все змінам температури та інтенсивності сонячного освітлення, пов'язаних з частинами доби та зміною сезонів. Ці впливи позначаються на продуктивності культивування, у результаті чого змінюється кількість біомаси та кількість ліпідів отриманих з одиниці площі, відведеної для культивування.

Середня інтенсивність сонячної радіації, що досягає поверхні земної атмосфери (сонячна стала), за даними Всесвітньої метеорологічної організації, складає 1367 Вт/м^2 (густина потоку фотонів $2555,5 \text{ мкмоль/м}^2 \cdot \text{сек}$). Через відбивання та розсіювання атмосферою поверхні землі досягає максимум 1000 Вт/м^2 ($2162 \text{ мкмоль/м}^2 \cdot \text{сек}$). Реальна інтенсивність сонячної радіації, що досягає земної поверхні може коливатися у широких межах, а саме від 50 Вт/м^2 ($108,1 \text{ мкмоль/м}^2 \cdot \text{сек}$) при затягнутому хмарами небі до 1000 Вт/м^2 ($2162 \text{ мкмоль/м}^2 \cdot \text{сек}$). При цьому середня інтенсивність у більшості районів земної кулі коливається від 200 ($432,4 \text{ мкмоль/м}^2 \cdot \text{сек}$) до 250 Вт/м^2 ($540,5 \text{ мкмоль/м}^2 \cdot \text{сек}$).

Залежно від регіону максимальна кількість енергії, що надходить на земну поверхню в Україні за день, може досягати 330 Вт/м^2 ($713,5 \text{ мкмоль/м}^2 \cdot \text{сек}$) влітку і 125 Вт/м^2 ($270,3 \text{ мкмоль/м}^2 \cdot \text{сек}$) взимку (у безхмарні сонячні дні).

Не вся енергія сонячного випромінювання може використовуватися для процесів фотосинтезу. З усього спектру випромінювання сонця використовується діапазон фотосинтетично активного випромінювання (ФАВ) від 400 до 700 нм довжини хвилі, що майже співпадає з видимим світлом (380 – 780 нм). Інтенсивність фотосинтезу у цьому діапазоні не є величиною сталою. Залежність інтенсивності фотосинтезу від довжини хвилі показано на рис. 1.

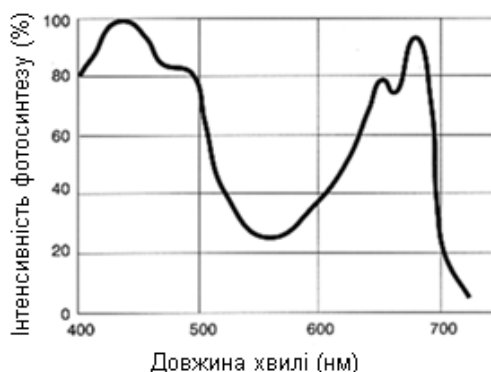


Рисунок 1 – Залежність інтенсивності фотосинтезу від довжини хвилі у діапазоні ФАВ [18]

На цей діапазон припадає близько 47 % енергії сонячного випромінювання.

Відомо, що під час фотосинтезу для поглинання однієї молекули CO_2 з перетворенням її у вуглеводи (емпірична формула $\text{C}_m(\text{H}_2\text{O})_n$ використовується 8 фотонів [14]. Середню енергію одного фотона в діапазоні ФАВ оцінюють у $217,4 \text{ кДж}$. Теплоту згоряння одного моля $\text{C}(\text{H}_2\text{O})$, а отже запасену у ньому енергію, оцінюють у 468 кДж/моль . Виходячи з цього, максимальна теоретична ефективність перетворення енергії ФАВ у вуглеводні визначається за формулою:

$$\varepsilon_{\text{ФАВ} \rightarrow \text{C}_m(\text{H}_2\text{O})_n} = \frac{\varepsilon_{\text{C}_m(\text{H}_2\text{O})_n}}{8 \times \varepsilon_{\text{ФАВ}}} \times 100\% \quad (1)$$

Ця ефективність складе:

$$\varepsilon_{\text{ФАВ} \rightarrow \text{C}_m(\text{H}_2\text{O})_n} = \frac{468}{8 \times 217,4} \times 100\% = 26,9\% \quad (2)$$

Крім того, під час передачі сонячної енергії організмам мікродоростей відбуваються також додаткові її втрати через розсіювання та відбивання. Ці втрати оцінюють у додаткові 10 % [17]. Тобто ефективність засвоєння з урахуванням розсіювання та відбивання складає:

$$\varepsilon_{\text{розс.відбив}} = 100\% - 10\% = 90\% \quad (3)$$

Таким чином максимальна теоретична ефективність засвоєння усієї сонячної енергії у процесі фотосинтезу може бути оцінена

$$\varepsilon_{\text{засв.сон.ен}} = 0,47 \times 0,269 \times 0,9 \times 100\% = 11,38\% \quad (4)$$

Така модель недостатньо добре відображає реальність, оскільки за даними [17], ефективність засвоєння сонячної енергії в реальних (польових) умовах мікродоростями під час культивування їх у відкритих ємностях переважно коливається в інтервалі 3–6 %. Таке зниження ефективності досягається додатковими втратами енергії на нічне дихання, фотоінгібування тощо.

Розглянемо вплив інтенсивності освітлення культурального середовища на продуктивність культивування, використовуючи енергетичний баланс фотосинтезу [19]. Добову продуктивність за біомасою одиниці площі водойми $P_{\text{біом}}$ можна визначити за формулою:

$$P_{\text{біом}} = \frac{I_{\text{опром}}}{E_{\text{біом}}} \times k_{\text{пер}} \times k_{\text{конв}} \cdot \left(\frac{r}{\text{м}^2 \cdot \text{добу}} \right) \quad (5)$$

де $I_{\text{опром}}$ – енергія сонячної радіації, що падає на одиницю площі у місці розташування водойми з культуральною рідиною та мікродоростями (кДж/м²·добу); $E_{\text{біом}}$ – кількість енергії, що запасується в одиниці маси мікродоростей, що культивуються (МДж/кг); $k_{\text{пер}}$ – коефіцієнт, що враховує ефективність передавання енергії сонячного випромінювання особинам мікродоростей; $k_{\text{конв}}$ – коефіцієнт, що враховує ефективність конверсії енергії отриманого сонячного випромінювання особинами мікродоростей у біомасу.

Коефіцієнт ефективності передавання енергії може бути визначений за формулою:

$$k_{\text{пер}} = k_{\text{розп}} \times k_{\text{плоч}} \times k_{\text{фотосинт}} \times k_{\text{абс}}, \quad (6)$$

де $k_{\text{розп}}$ – коефіцієнт, що враховує ефективність розповсюдження сонячного світла через культуральне середовище (розсіювання на шляху); $k_{\text{плоч}}$ – коефіцієнт, що враховує ефективність використання площі падіння сонячного випромінювання (відношення робочої поверхні культуральної рідини до усієї поверхні опромінення); $k_{\text{фотосинт}}$ – коефіцієнт, що враховує частину сонячного випромінювання, що припадає на спектр, активний при фотосинтезі; $k_{\text{абс}}$ – коефіцієнт абсорбції світла мікродоростями.

Коефіцієнт конверсії енергії отриманого сонячного випромінювання у біомасу може бути визначений за формулою:

$$k_{\text{конв}} = k_{\text{погл.фотон}} \times k_{\text{засв.фотон}} \times (1 - k_{\text{дих}}), \quad (7)$$

де $k_{\text{погл.фотон}}$ – коефіцієнт, що враховує ефективність поглинання фотонів випромінювання у процесі фотосинтезу; $k_{\text{засв.фотон}}$ – коефіцієнт, що враховує ефективність засвоєння енергії фотонів у процесі фотосинтезу; $k_{\text{дих}}$ – коефіцієнт врахування частини енергії, що витрачається у темний період доби для забезпечення процесу нічного дихання.

Теоретично, за оптимальних умов, клітини мікродоростей можуть засвоювати практично усі фотони, що їх досягають. Тобто $k_{\text{засв.фотон}}$ має наближатись до одиниці. Проте, такі несприятливі умови, як високий рівень освітленості, відхилення від оптимальної температури, за яких посилюються ефекти фотоінгібування, знижують значення цього коефіцієнта. За підвищеної температури поглинуті фотони, навіть за досить високих значень $k_{\text{погл.фотон}}$ можуть знову випромінюватися клітинами мікродоростей у навколишнє середовище як теплове випромінювання. За занадто інтенсивного освітлення поглинуті фотони можуть здійснювати руйнівний вплив на клітини.

Можна стверджувати, що рівень ефективності засвоєння фотонів залежить від рівня освітленості, температури середовища та інших умов. Особливо значний вплив на цей показник здійснює рівень освітлювання.

Процес фотосинтезу характеризується поняттям насичення. З огляду на рівень освітлення насиченням називають такий його рівень, при котрому інтенсивність фотосинтезу досягає найбільшого значення.

Залежність інтенсивності фотосинтезу від інтенсивності освітлення в цілому є логарифмічною. Пряма залежність спостерігається лише при низьких інтенсивностях освітлення. При збільшенні освітленості фотосинтез посилюється.

Проте, при збільшенні інтенсивності освітлення понад інтенсивність насичення для багатьох штамів мікродоростей інтенсивність фотосинтезу зменшується.

У більшості випадків світлове насичення досягається при густині потоку фотонів 200 мкмоль/м²·сек (92,5 Вт/м²) [20].

Коефіцієнт ефективності засвоєння енергії фотонів можна визначити за формулою:

$$k_{\text{засв.фот}} = \frac{I_{\text{насич}}}{I_{\text{пад}}} \times \left[\ln \left(\frac{I_{\text{пад}}}{I_{\text{насич}}} \right) + 1 \right], \quad (8)$$

де $I_{\text{насич}}$ – густина насичення фотосинтетично активної радіації опромінюваного світла (мкмоль/м²·сек); $I_{\text{пад}}$ – густина фотосинтетично активної радіації падаючого світла (мкмоль/м²·сек).

Відповідно до формули 8 залежність коефіцієнта $k_{\text{засв.фот}}$ від співвідношення густин падаючого випромінювання та випромінювання насичення $\frac{I_{\text{пад}}}{I_{\text{насич}}}$ має логарифмічний характер. Графічно цю залежність наведено на рисунку 2.

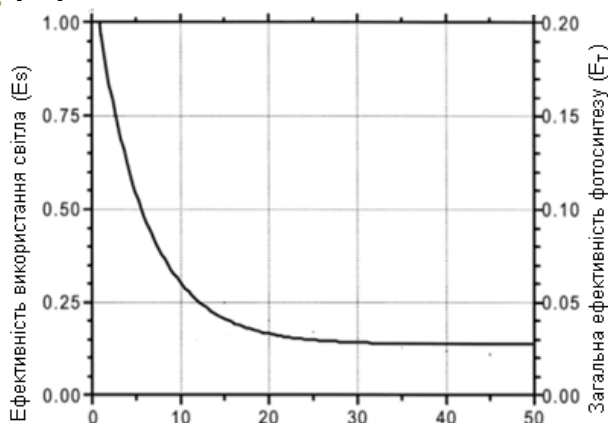


Рисунок 2 – Залежність коефіцієнта ефективності засвоєння енергії фотонів від співвідношення густин падаючого випромінювання та випромінювання насичення

Така залежність справедлива тільки для умови, коли $\frac{I_{\text{пад}}}{I_{\text{насич}}} \geq 1$. Тобто коли густина падаючого випромінювання не менше густини насичення. При цьому з наближенням $\frac{I_{\text{пад}}}{I_{\text{насич}}}$ до одиниці, $k_{\text{засв.фот}}$ зростає до одиниці. У діапазоні коли $\frac{I_{\text{пад}}}{I_{\text{насич}}} < 1$, зі зменшенням значення цього співвідношення значення $k_{\text{засв.фот}}$ стрімко зменшується, що не відповідає експериментальним даним, відповідно до яких, при малих значеннях густини опромінювання цей коефіцієнт залишається близьким до одиниці. Тому формулу 8 доцільно використовувати тільки за умови $\frac{I_{\text{пад}}}{I_{\text{насич}}} \geq 1$.

Добову продуктивність по синтезу ліпідів одиниці площі водойми $P_{\text{ліп}}$ можна визначити за формулою:

$$P_{\text{ліп}} = \frac{k_{\text{ліп}} \times P_{\text{біом}}}{\rho_{\text{ліп}}}, \left(\frac{\text{мл}}{\text{м}^2 \cdot \text{добу}} \right), \quad (9)$$

де $k_{\text{ліп}}$ – коефіцієнт, що враховує вміст ліпідів у біомасі мікробіодоростей, що можуть бути використані для виробництва готової продукції (наприклад біопалива); $\rho_{\text{ліп}}$ – густина ліпідів (кг/л).

Розрахуємо продуктивність протягом року за біомасою та продуктивністю за ліпідами під час культивування мікробіодоростей у відкритих ємкостях за умов здійснення процесу у Київській області.

За даними NASA, що є усередненими на підставі 20 річних спостережень за рівнем освітленості території України, середньомісячний рівень сонячної радіації у місті Києві наведено у таблиці 1.

Таблиця 1 – Середній місячний рівень сонячної радіації у місті Києві [21]

Місяць	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
$\frac{I_{\text{опром}}}{\text{кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^2 \cdot \text{добу}}$	1,07	1,87	2,95	3,96	5,25	5,22	5,25	4,67	3,12	1,94	1,02	0,86

Розрахуємо продуктивність при культивуванні у липні місяці.

Продуктивність мікробіодоростей за біомасою визначаємо за формулою 5. Для цього переводимо інтенсивність опромінювання у $\text{кДж}/\text{м}^2 \cdot \text{добу}$. Для липня місяця $I_{\text{опром}} = 5,25 \text{ кВт} \cdot \text{год}/\text{м}^2 \cdot \text{добу} = 18900 \text{ кДж}/\text{м}^2 \cdot \text{добу}$. Кількість енергії, що запасється в одиниці маси мікробіодоростей, що культивуються, прийнято $E_{\text{біом}} = 14,21 \text{ МДж}/\text{кг}$ [14].

Коефіцієнт, що враховує ефективність передавання енергії сонячного випромінювання особинам мікробіодоростей, визначаємо за формулою 6:

$$k_{\text{пер}} = 0,98 \times 0,98 \times 0,458 \times 1,0 = 0,44 \quad (10)$$

Тут $k_{\text{розп}}$ прийнято 0,98 та $k_{\text{площ}}$ прийнято 0,98 як для відкритих ємностей [17], $k_{\text{фотосинт}}$ прийнято 0,458 [22], $k_{\text{абс}}$ – прийнято 1,0 [19].

Коефіцієнт конверсії енергії отриманого сонячного випромінювання у біомасу визначаємо за формулою 7. Для цього попередньо визначаємо коефіцієнт ефективності засвоєння енергії фотонів за формулою 8:

$$k_{\text{засв.фот}} = \frac{200}{460,9} \times \left[\ln \left(\frac{460,9}{200} \right) + 1 \right] = 0,79 \quad (11)$$

Тут $I_{\text{насих}}$ прийнято 200 (мкмоль/м²·сек) [20], $I_{\text{пад}}$ виражено у відповідних одиницях $I_{\text{пад}} = 5,25$ кВт·год/м²·добу = 460,9 (мкмоль/м²·сек).

Таким чином коефіцієнт конверсії складе:

$$k_{\text{конв}} = 0,269 \times 0,79 \times (1 - 0,2) = 0,170 \quad (12)$$

Тут $k_{\text{погл.фотон}} = 0,269$ (див. розрахунок ефективності перетворення енергії ФАВ у вуглеводні $\epsilon_{\text{ФАВ} \rightarrow \text{C}_m(\text{H}_2\text{O})_n}$, що виконано вище), $k_{\text{дих}}$ прийнято 0,2 [19].

Для помісячного розрахунку $k_{\text{засв.фотон}}$ застосовуємо формулу 8 тільки для місяців з березня по вересень, коли задовольняється умова $\frac{I_{\text{пад}}}{I_{\text{насих}}} \geq 1$. Для решти місяці приймаємо $k_{\text{засв.фотон}} = 0,99$.

Продуктивність мікродоростей за біомасою, визначена за формулою 5, складе

$$P_{\text{біом}} = \frac{18900}{14,21} \times 0,44 \times 0,170 = 99,5, \left(\frac{\text{г}}{\text{м}^2 \cdot \text{добу}} \right) \quad (13)$$

Продуктивність за синтезом ліпідів визначаємо за формулою 9.

$$P_{\text{ліп}} = \frac{0,2 \times 99,5}{0,85} = 23,41, \left(\frac{\text{мл}}{\text{м}^2 \cdot \text{добу}} \right) \quad (14)$$

Тут коефіцієнт вмісту ліпідів у біомасі, що можуть бути використані $k_{\text{ліп}}$, прийнято 0,2, що є одним з найнижчих, враховуючи дані джерел [23, 24, 25, 26], густину виділеної з біомаси олії (ліпідів) $\rho_{\text{ліп}}$ прийнято 0,85 кг/л [27].

Результати розрахунку для решти місяців року зводимо до таблиці 2.

Таблиця 2 – Розрахунок помісячної продуктивності культивування мікродоростей в умовах міста Києва

Місяць	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
$I_{\text{опром}}, \frac{\text{кВт} \cdot \text{год}}{\text{м}^2 \cdot \text{добу}}$	1,07	1,87	2,95	3,96	5,25	5,22	5,25	4,67	3,12	1,94	1,02	0,86
$I_{\text{опром}}, \frac{\text{кДж}}{\text{м}^2 \cdot \text{добу}}$	3852	6732	10620	14256	18900	18792	18900	16812	11232	6984	3672	3096
$I_{\text{опром}}, \frac{\text{мкмоль}}{\text{м}^2 \cdot \text{сек}}$	205,1	358,4	565,4	759,0	1006,3	1000,5	1006,3	895,1	598,0	371,8	195,5	164,8

$I_{\text{ФСА}},$ $\frac{\text{МКМОЛЬ}}{\text{М}^2 \cdot \text{сек}}$	93,9	164,1	258,9	347,6	460,9	458,2	460,9	409,9	273,9	170,3	89,5	75,5
$k_{\text{засв.фотон}}$	0,99	0,99	0,97	0,90	0,79	0,80	0,79	0,84	0,96	0,99	0,99	0,99
$k_{\text{конв}}$	0,213	0,213	0,209	0,194	0,170	0,172	0,170	0,181	0,207	0,213	0,213	0,213
$P_{\text{біом}}$	25,4	44,4	68,7	85,6	99,5	100,1	99,5	94,2	72,0	41,1	24,2	20,4
$P_{\text{ліп}}$	5,98	10,45	16,16	20,14	23,41	23,55	23,41	22,16	16,90	10,84	5,69	4,80

Виходячи з отриманих результатів, під час культивування мікродоростей в умовах Києва річна продуктивність по біомасі складе 22,86 кг/м², річна продуктивність по ліпідах складе 5,35 кг/м².

Культивування мікродоростей у промислових масштабах стикається з багатьма труднощами, перш за все економічного характеру. Забезпечення достатньої кількості культурального середовища вимагає використання значних об'ємів води та поживних речовин. Значними також є затрати на електроенергію для перемішування культурального середовища з мікродоростями з метою забезпечення рівномірного освітлення. Під час культивування у холодний період року необхідно підігрівання для температурної стабілізації. Культивування в умовах України також поступається багатьом регіонам світу за кількістю сонячної енергії, що досягає земної поверхні. Так, середньорічна кількість енергії сонячної радіації для міста Києва складає 3,1 кВт·год/м², для міста Дніпро – 3,36 кВт·год/м², для міста Херсон – 3,55 кВт·год/м², для міста Львів – 2,92 кВт·год/м². Разом з тим, цей показник для США (штат Техас) складає 4,7 кВт·год/м², для Іспанії (Мадрид) – 4,75 кВт·год/м², для Індії (Ченнаї) – 5,23 кВт·год/м², для Австралії (Квінсленд) – 5,90 кВт·год/м², для Ефіопії – 6,14 кВт·год/м² [14].

Разом з тим мікродорості мають властивості у процесі фотосинтезу поглинати з культурального середовища біогенні елементи, перш за все сполуки азоту та фосфору [28, 29, 30].

Враховуючи це, для підвищення економічної ефективності процесів культивування їх доцільно поєднати з процесами очищення комунальних стічних вод від біогенних елементів. При цьому стічні води мають попередньо пройти механічне та біологічне очищення традиційними методами для набуття достатнього рівня прозорості [31]. Такі стічні води містять значну кількість біогенних елементів (сполук азоту та фосфору), а також інших поживних речовин. Їх концентрація на виході з традиційних очисних споруд не є постійною, а коливається залежно від багатьох факторів. Скидання цих елементів у відкриті водойми разом зі стічними водами часто є причиною евтрофікації цих водойм (швидкого розвитку фітопланктону у воді, перш за все на її поверхні). Це знижує здатність світла та кисню проникати у товщу води, а їх нестача там призводить до загибелі флори та фауни. Мікродорості є гарними поглиначами біогенних елементів. Вони використовують азотні та фосфорні сполуки у процесі фотосинтезу. Їх видалення зі стічних вод знижує ризики розвитку евтрофікаційних процесів у водоймах.

Висновки.

Мікродорості можна вважати перспективною сировиною для виробництва біопалива третього та четвертого покоління. Під час їх культивування у відкритих водоймах за природних умов Київської області можна досягати продуктивності 22,86 кг/м² за рік. При цьому продуктивність за ліпідами може складати 5,35 кг/м² за рік. Враховуючи затрати на забезпечення процесу культивування, перш за все на приготування культурального розчину, температурну стабілізацію та електричну енергію на перемішування, економічна ефективність цього процесу може бути невисокою. Для підвищення цієї ефективності доцільним може бути поєднання процесів культивування з процесами очищення комунальних стічних вод від біогенних елементів. Тим самим можна знижувати ризики розвитку евтрофікаційних процесів у відкритих водоймах під час скидання до них очищених стічних вод.

Список використаної літератури

1. Сорокина К. Н., Яковлев В. А., Пилигаев А. В., Кукушкин Р. Г., Пельтек С. Е., Колчанов Н. А., Пармон В. Н. Потенциал применения микродорослей в качестве сырья для биоэнергетики // Катализ в промышленности. – 2012. №2. – С. 63–72.
2. Бойченко С. В. Рациональное использование углеводневых топлив. – К.: НАУ, 2001. – 216 с.
3. Вступ до хімотології палив та олів: Навчальний посібник у двох частинах / Бойченко С. В., Спіркін В. Г. – Одеса: «Астропринт», 2009. – Ч. 1. – 236 с.
4. Aksenov A. F., Seregin E. P., Yanovskii L. S., and Boichenko S. V. Modern Paradigm and Prospects of Chemmotology Development // Chemistry and Technology of Fuels and Oils. – № 4 (578). – 2013. – P. 13–20.
5. Бойченко Сергій. Хімотологія як прикладна наука – інтегрований теоретико-методологічний інструмент сталого забезпечення раціонального використання паливно-мастильних матеріалів / Олександр

Аксьонов, Сергій Бойченко, Казимир Лейда // Проблеми хімотології. Теорія та практика раціонального використання традиційних і альтернативних паливно-мастильних матеріалів: Монографія / за заг. ред. проф. С. В. Бойченка. – К.: Центр навчальної літератури, 2017. – Розд. I. – С. 8–13.

6. Sergii Boichenko. Phenomenological concept of chemmotology / Sergii Boichenko // Proceedings of National Aviation University. – 2017. – № 1. – P. 113–119. DOI: 10.18372/2306-1472.70.11431.

7. S. Boichenko, O. Vovk, I. Shkilniuk, K. Lejda. Traditional and alternative jet fuels: problems of quality standardization // Journal of Petroleum & Environmental Biotechnology. 2013. – Vol. 4. – Iss. 3. DOI: <http://dx.doi.org/10.4172/2157-7463.1000146>.

8. Яковлева А.В., Бойченко С.В. Потенциал использования биотоплив на основ растительных масел в авиации // Охрана окружающей среды и природопользование. – ОАО «НИИ Атмосфера». – Санкт-Петербург. – № 2. – 2013. – С. 18–27.

9. Iakovlieva A.V. Overview of innovative technologies for aviation fuels production A.V. Iakovlieva, S.V. Boichenko, O. O. Vovk // Journal of Chemistry and chemical technology. – 2013. – Vol. 7. – № 3. – P. 305–312.

10. Біохімічний метод отримання етилового спирту / С. М. Гарасимчук, А. О. Азаренкова, М. С. Бойченко, М. Н. Барановський // Наукоємні технології. – 2014. – Т. 21. – №1. – С. 18–21.

11. Авиационная химмотология: топлива для авиационных двигателей. Теоретические и инженерные основы применения: учебник / Н. С. Кулик, А. Ф. Аксенов, Л. С. Яновский, С. В. Бойченко. – К.: НАУ, 2015. – 560 с.

12. Л.М. Черняк, М.С. Бойченко, М.М. Захарчук, А.В. Яковлева Світові проблеми та перспективи впровадження альтернативних палив з водоростей // Екологічний інтелект – 2012. VII Міжнародна науково-практична конференція молодих вчених, 24-25 квітня 2012 р.: тези доп. – Дніпропетровськ, 2012. – С. 205–206.

13. Kasturi Dutta, Achlesh Daverey, Jih-Gaw Lin. Evolution retrospective for alternative fuels: First to fourth generation // Renewable Energy. – 2014. – V. 69. – P. 114–122.

14. Sudhakar K., Premalatha M. Theoretical Assessment of Algal Biomass Potential for Carbon Mitigation and Biofuel Production // Iranian Journal of Energy and Environment. – 2012. – №3. – P. 232–240.

15. Hussain K., Nawaz K., Majeed A. Lin F. Economically Effective Potential of Algae for Biofuel Production // World Applied Sciences Journal. – 2010. №9(11). – P. 1313–1323.

16. Моторні палива: властивості та якість. Підручник / Сергій Бойченко, Андрій Пушак, Петро Топільницький, Казимир Лейда; за заг. ред. проф. С. Бойченка. – К.: НАУ, 2017. – 328 с.

17. Abraham M. Asmare, Berhanu A. Demessie, Ganti S. Murthy. Theoretical Estimation the Potential of Algal Biomass for Biofuel Production and Carbon Sequestration in Ethiopia // International Journal of Renewable Energy Research. – 2013. – Vol. 3. – №3. – P. 560–570.

18. Теплица Эксперт, 2017 – Электронный ресурс [Режим доступа] <http://teplica-exp.ru/tag/osveshhenie/>

19. Sudhakar K., Rajesh M., Premalatha M. A Mathematical Model to Assess the Potential of Algal Bio-Fuels in India // Energy Sources. – 2012. Part A, 34. – P. 1114–1120.

20. Giuseppe Torzillo, Benjamin Pushparaj, Jiri Masojidek, Avigad Vonshak. Biological Constraints in Algal Biotechnology // Biotechnology and Bioprocess Engineering. – 2003. – №8. – P. 338–348.

21. Карта солнечной активности в Украине, 2017 – Электронный ресурс [режим доступа] <http://www.solar-battery.com.ua/karta-solnechnoy-aktivnosti-v-ukraine/>

22. Jacovides C. P., Timvios F. S., Papaioannou G., Asimakopoulos D. N., Theofilou C. M. Ratio of PAR to Broadband Solar Radiation Measured in Cyprus // Agricultural and Forest Meteorology. – 2004. – №121. – P. 135–140.

23. Pooja K. Himabindu V. Mixotrophic Cultivation of Botryococcus Braunii for Biomass and Lipid Yields with Simultaneous CO₂ Sequestration // Journal of Engineering Research and Applications. – 2014. – Vol. 4, Issue 10 (Part – 6). – P. 151–156.

24. Chan-Hee Lee, Hyun-Sik Chae, Seung-Hoon Lee, Han Soon Kim. Growth Characteristics and Lipid Content of three Korean Isolates of Botryococcus Braunii (Trebouxiophyceae) // Ecology and Environment. – 2015. – №38 (1). – P. 67–74.

25. Asma J. Yusoff F. M., Srikanth R. M. Growth Rate Assessment of High Lipid Producing Microalga Botryococcus braunii in Different Culture Media // Iranian Journal of Fisheries Sciences. – 2015. – №14 (2), – P. 436–445.

26. Khalid A. Al-Hothaly, Aidyn Mouradov, Abdulatif A. Mansur, Brian H. May, Andrew S. Ball, Eric M. Adetutu. The Effect of Media on Biomass and Oil Production in Botryococcus braunii Strains Kossou-4 and Overjuyo-3 // International Journal of Clean Coal and Energy. – 2015. – №4. – P. 11–22.

27. Xu H., Miao X. L., Wu Q. Y. High Quality Biodiesel Production from a Microalga Chlorella Protothecoides by Heterotrophic Growth in Ferments // Jurnal of Biotechnology. – 2006. – №126. – P. 499–507.

28. Delgadillo-Mirquez L., Lopes F., Taidi B., Pareau D. Nitrogen and Phosphate Removal from Wastewater with a Mixed Microalgae and Bacteria Culture // *Biotechnology Reports*. – 2016. – №11. – P. 18–26.
29. Manea R. G., Ardelean I. I. Nitrogen and Phosphorus Removal from Municipal Wastewater Using Consortia of Photosynthetic Microorganisms // *Scientific Bulletin. Series F. Biotechnologies*. – 2016. – Vol. XX. – P. 286–292.
30. Singh R., Birru R., Sibi G. Nitrogen Removal Efficiencies of *Chlorella Vulgaris* from Urban Wastewater for Reduced Eutrophication // *Journal of Environmental Protection*. – 2017. – №8. – P. 1–11.
31. Shamanskyi S., Boichenko S. Development of Environmentally Safe Technological Water Disposal Scheme of Aviation Enterprise / С. Й. Шаманський, С. В. Бойченко // *Восточно-европейский журнал передовых технологий*. – 2016. – №6/10(84). – С. 49–57.

S. Shamanskyi, Cand. Sc. (Eng.)

M. Boichenko, Ph.D. student

L. Pavliukh, Cand. Sc. (Eng.) Assoc. Prof.

National Aviation University

MODELING OF MASS AND LIPID PRODUCTIVITY OF MICROALGAE CULTIVATION IN THE KYIV REGION

In article prospects of the third and fourth generation of biofuels production were analyzed. The algae cultivation with high lipid content in biomass as a raw material for this production is proposed. The influence of illumination intensity of the culture medium on the cultivation productivity, using the energy balance of photosynthesis, is considered. The mathematical model of calculating the cultivation productivity in open capacities depending on the solar radiation intensity is proposed. Based on the average monthly solar radiation levels in the Kyiv city, received by NASA, which are averaged based on 20 years observations by illumination level of the territory of Ukraine, the cultivation productivity during the year for weather conditions in the Kyiv region was estimated using the proposed model. The resulting productivity with productivity which can be achieved in other parts of the world was compared. To increase the economic efficiency of biofuel production, it is proposed to use as a culture medium pre-purified municipal sewage by traditional methods. This will enable to combine the processes of raw materials cultivation for biofuels and the processes of sewage purification from biogenic elements.

Key words: biofuel, cultivation efficiency, lipids, sewage treatment, biogenic elements.

References

1. Sorokina K. N., Yakovlev V. A., Piligayev A. V., Kukushkin R. G., Peltek S. E., Kolchanov N. A., Parmon V. N. The potential of application of microalgae as a raw material for bioenergetics // *Catalyst in industry*. - 2012. №2. - P. 63-72.
2. Boichenko S. V. Rational use of hydrocarbon fuels. - K.: NAU, 2001. - 216 p.
3. Introduction to the chemotology of fuels and oils: A manual in two parts / S. Boichenko, V. Spirkin - Odessa: "Astroprint", 2009. - Ch. 1. - 236 p.
4. Aksenov A. F., Seregin E. P., Yanovskii L. S., Boichenko S. V. Modern Paradigm and Prospects of Chemmotology Development // *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*. – № 4 (578). – 2013. – P. 13–20.
5. Boichenko Sergii. Chemotology as Applied Science - Integrated Theoretical and Methodological Tool for the Sustainable Provision of Rational Use of Fuels and Lubricants / Alexander Aksenov, Sergii Boichenko, Kazimir Leida // *Problems of chemotology. Theory and practice of rational use of traditional and alternative fuels and lubricants: Monograph / per comp. Ed. prof. S. V. Boichenko*. - K.: Center for Educational Literature, 2017. - Part. I. - P. 8-13.
6. Sergii Boichenko. Phenomenological concept of chemmotology / Sergii Boichenko // *Proceedings of National Aviation University*. – 2017. – № 1. – P. 113–119. DOI: 10.18372/2306-1472.70.11431.
7. S. Boichenko, O. Vovk, I. Shkilniuk, K. Lejda. Traditional and alternative jet fuels: problems of quality standardization // *Journal of Petroleum & Environmental Biotechnology*. 2013. – Vol. 4. – Iss. 3. DOI: <http://dx.doi.org/10.4172/2157-7463.1000146>.
8. Yakovlieva A. V., Boichenko S. V. The potential of using biofuels on the basis of vegetable oils in aviation // *Environmental protection and nature management*. - JSC "Atomosphere Research Institute". - St. Petersburg. - No. 2. - 2013. - P. 18-27.
9. Iakovlieva A. V. Overview of innovative technologies for aviation fuels production A. V. Iakovlieva, S. V. Boichenko, O. O. Vovk // *Journal of Chemistry and chemical technology*. – 2013. – Vol. 7. – № 3. – P. 305–312.
10. Biochemical method of obtaining ethyl alcohol / S. M. Garasymchuk, A. O. Azarenkova, M. S. Boichenko, M. N. Baranovsky // *Science-based technologies*. - 2014 - T. 21. - No. 1. - P. 18-21.

11. Aviation Chemmotology: Fuel for Aviation Engines. Theoretical and engineering fundamentals of application: a textbook / M. S. Kulyk, A. F. Aksenov, L. S. Yanovsky, S. V. Boichenko. - K.: NAU, 2015 - 560 pp.
12. L.M. Chernyak, M.S. Boichenko, M.M. Zakharchuk, A.V. Yakovlieva. World problems and prospects for implementation of alternative fuels from algae // Ecological Intellect - 2012. VII International Scientific and Practical Conference of Young Scientists, April 24-25, 2012: theses of additional. - Dnipropetrovsk, 2012. - P. 205-206.
13. Kasturi Dutta, Achlesh Daverey, Jih-Gaw Lin. Evolution retrospective for alternative fuels: First to fourth generation // Renewable Energy. – 2014. – V. 69. – P. 114–122.
14. Sudhakar K., Premalatha M. Theoretical Assessment of Algal Biomass Potential for Carbon Mitigation and Biofuel Production // Iranian Journal of Energy and Environment. – 2012. – №3. – P. 232–240.
15. Hussain K., Nawaz K., Majeed A. Lin F. Economically Effective Potential of Algae for Biofuel Production // World Applied Sciences Journal. – 2010. №9(11). – P. 1313–1323.
16. Motor fuels: properties and quality. Textbook / Sergii Boichenko, Andrii Pusach, Peter Topolnytskii, Kazimir Leida; per community Ed. prof. S. Boichenko. - K.: NAU, 2017. - 328 p.
17. Abraham M. Asmare, Berhanu A. Demessie, Ganti S. Murthy. Theoretical Estimation the Potential of Algal Biomass for Biofuel Production and Carbon Sequestration in Ethiopia // International Journal of Renewable Energy Research. – 2013. – Vol. 3. – №3. – P. 560–570.
18. Hothouse Expert, 2017 - Electronic resource [Access mode] <http://teplica-exp.ru/tag/osveshhenie/>
19. Sudhakar K., Rajesh M., Premalatha M. A Mathematical Model to Assess the Potential of Algal Bio-Fuels in India // Energy Sources. – 2012. Part A, 34. – P. 1114–1120.
20. Giuseppe Torzillo, Benjamin Pushparaj, Jiri Masojidek, Avigad Vonshak. Biological Constraints in Algal Biotechnology // Biotechnology and Bioprocess Engineering. – 2003. – №8. – P. 338–348.
21. Карта сонячної активності в Україні, 2017 – Електронний ресурс [режим доступу] <http://www.solar-battery.com.ua/karta-solnechnoy-aktivnosti-v-ukraine/>
22. Jacovides C. P., Timvios F. S., Papaioannou G., Asimakopoulos D. N., Theofilou C. M. Ratio of PAR to Broadband Solar Radiation Measured in Cyprus // Agricultural and Forest Meteorology. – 2004. – №121. – P. 135–140.
23. Pooja K. Himabindu V. Mixotrophic Cultivation of Botryococcus Braunii for Biomass and Lipid Yields with Simultaneous CO₂ Sequestration // Journal of Engineering Research and Applications. – 2014. – Vol. 4, Issue 10 (Part – 6). – P. 151–156.
24. Chan-Hee Lee, Hyun-Sik Chae, Seung-Hoon Lee, Han Soon Kim. Growth Characteristics and Lipid Content of three Korean Isolates of Botryococcus Braunii (Trebouxiophyceae) // Ecology and Environment. – 2015. – №38 (1). – P. 67–74.
25. Asma J. Yusoff F. M., Srikanth R. M. Growth Rate Assessment of High Lipid Producing Microalga Botryococcus braunii in Different Culture Media // Iranian Journal of Fisheries Sciences. – 2015. – №14 (2), – P. 436–445.
26. Khalid A. Al-Hothaly, Aidyn Mouradov, Abdulatif A. Mansur, Brian H. May, Andrew S. Ball, Eric M. Adetutu. The Effect of Media on Biomass and Oil Production in Botryococcus braunii Strains Kossou-4 and Overjuyo-3 // International Journal of Clean Coal and Energy. – 2015. – №4. – P. 11–22.
27. Xu H., Miao X. L., Wu Q. Y. High Quality Biodiesel Production from a Microalga Chlorella Protothecoides by Heterotrophic Growth in Ferments // Jurnal of Biotechnology. – 2006. – №126. – P. 499–507.
28. Delgadillo-Mirquez L., Lopes F., Taidi B., Pareau D. Nitrogen and Phosphate Removal from Wastewater with a Mixed Microalgae and Bacteria Culture // Biotechnology Reports. – 2016. – №11. – P. 18–26.
29. Manea R. G., Ardelean I. I. Nitrogen and Phosphorus Removal from Municipal Wastewater Using Cinsortia of Photosynthetic Microorganisms // Scientific Bulletin. Series F. Biotechnologies. – 2016. – Vol. XX. – P. 286–292.
30. Singh R., Birru R., Sibi G. Nitrogen Removal Efficiencies of Chlorella Vulgaris from Urban Wastewater for Reduced Eutrophication // Journal of Environmental Protection. – 2017. – №8. – P. 1–11.
31. Shamanskyi S., Boichenko S. Development of Environmentally Safe Technological Water Disposal Scheme of Aviation Enterprise / С. Й. Шаманський, С. В. Бойченко // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2016. – №6/10(84). – С. 49–57.

Надійшла 05.12.2017

Received 05.12.2017

ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ

Для подання рукопису до журналу автори повинні дотримуватись всіх встановлених вимог, які вказані нижче.

У разі невідповідності поданих матеріалів статті пунктам цих вимог, а також якщо вони не відповідають тематиці наукового журналу, редакція повертатиме авторам матеріали на доопрацювання!

Обсяг статті

Загальний обсяг статті – від 6 до 10 сторінок формату А4. Сторінки повністю заповнені текстом. Схеми, рисунки, таблиці й формули повинні бути пронумеровані та розміщені в тексті після посилань на них. Матеріал має бути викладений стисло, без повторювань даних таблиць і рисунків у тексті. Неприпустимо використовувати елементи форматування як «розрив розділу з нової сторінки» та колонтитули.

Стаття має бути ретельно перевірена авторами та відповідати всім пунктам вимог до оформлення!!!

Текстовий редактор

Стаття набирається в текстовому редакторі **Microsoft Word (версії 2007 та вище)** і зберігається з розширенням *.doc або *.docx.

Обов'язково надсилається стаття, збережена у форматі *.pdf !!!

Загальне оформлення:

1) **Мова.** Статті приймаються до друку трьома мовами: українською, російською, англійською.

2) **Параметри сторінки:**

- Поля: зліва, справа, зверху, знизу – 2,5 см.
- Вирівнювання основного тексту – за шириною.
- Перші рядки всіх абзаців – з відступом 1,0 см!!!
- Шрифт – Times New Roman, кегль 10, міжрядковий інтервал 1.
- Назва статті друкується великими (Caps Lock) напівжирними літерами (Ж) – кегль 14.
- Заголовки елементів основного тексту (Вступ, Мета та завдання тощо) виділяються напівжирним шрифтом (Ж).

3) **Структура статті:**

- **номер УДК** (у верхньому лівому кутку сторінки, напівжирним шрифтом кегль 10)
- **прізвища авторів** (приклад: **І.І. Петренко** (укр.), **И.И. Петренко** (рос.) **I. Petrenko** (англ)) та відомості про авторів (науковий ступінь, вчене звання); **індекс ORCID – обов'язково;**
- **(Порядок оформлення наукових ступенів та вчених звань описано нижче в цьому ж документі в розділі «Рекомендовані скорочення вчених звань і наукових ступенів»).**
- **повна назва організації** (навчального закладу, установи) – **вирівнювання за правим краєм;**
- **реферат обсягом від 1000 до 1100 знаків** повинен відображати короткий зміст статті, не повторювати назву, не містити загальних фраз та бути структурованим (мета дослідження, методика реалізації, результати дослідження, висновки). В англійській версії статті наводяться реферат обсягом 1700-2000 знаків,
- **ключові слова:** (6-8 слів), словосполучення «Ключові слова» – напівжирним + курсив.

Відповідно до постанови Президії ВАК України № 7-05/1 від 15.01.2003р. до друку приймаються наукові статті, що мають такі елементи:

Основний текст статті

Вступ (постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими або практичними завданнями; аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання даної проблеми, на які спирається автор; виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, яким присвячується зазначена стаття);

Мета та завдання (формулювання цілей статті, постановка завдання);

Матеріал і результати досліджень (виклад основного матеріалу дослідження, з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів, з можливим поділом на частини з відповідними назвами);

Рисунки (діаграми, фото тощо) подаються у **чорно-білому зображенні** разом із текстом, після посилань на них. **Вимога до графічних матеріалів:** будь-яка ілюстрація повинна бути єдиним нерозривним графічним об'єктом. Рекомендується застосування растрових форматів з роздільною здатністю **не менше 300 dpi**. Рисунок має бути розташований у **центрі, без обтікання текстом**. Підписи до рисунків повинні містити нумерацію в порядку розміщення в тексті та пояснювальний підпис. Неприпустимо включати підписи до самого рисунка. **Рисунок не повинен займати всю площу аркуша!!!**

Крапки після назви структурних частин статті не ставити.

Графіки повинні містити підписи **усіх осей на самому рисунку**. Будь-який інший вигляд підпису розглядатись та виправляти не буде!

Таблиці. При заповненні слід користуватись шрифтом 10 кеглю. Кожна таблиця повинна мати порядковий номер та назву і розташовуватись після посилання на неї у тексті статті. Якщо таблиця не вміщується на сторінці або виходить на іншу, слід використати позначення «Продовження табл.».

Формули повинні бути набрані за допомогою редактора формул **Math Type (версія 6.8 і вище)** або внутрішній редактор формул у Microsoft Word з **розмірами: звичайного символу – 11, великого індексу – 10, малого індексу – 9.** Кириличні та грецькі символи мають бути набрані прямим шрифтом, латинські літери – похилим. Виняток становлять символи операторів і стандартних функцій, які набираються прямим шрифтом. Нумерація формул, на які є посилання в тексті, – справа в дужках. Цілі частини від десяткових відокремлюються комою **Одиниці розмірності можна набирати окремо від формул, або у формулах, з обов'язковим використанням проміжку.**

Висновки: (навести основні висновки з дослідження та перспективи його подальшого розвитку в цьому напрямку).

Список використаної літератури наводиться в порядку посилань у тексті, відповідно до ДСТУ 8302:2015.(укр) Посилання на літературні джерела в тексті наводяться у квадратних дужках.

Список використаних літературних джерел подається **двічі:** мовою оригіналу відповідно до ДСТУ 8302:2015.(укр, рос) і англійською, відповідно до вимог IEEE style

У разі відсутності або низького рівня перекладу англійської версії списку використаної літератури (References) стаття буде повернута на доопрацювання!!!

Для надання відомостей про авторів англійською, або російською мовами, слід використовувати загальноприйнятую лексикку перекладу наукових ступенів, вчених звань, посад (описано в розділі «Рекомендовані скорочення вчених звань і ступенів»).

Англійська анотація за обсягом рекомендується більшою за українську (російську) 1700-к2000 знаків, оскільки для закордонних вчених анотація є, як правило, єдиним джерелом інформації про зміст статті.

У разі відсутності або низького рівня перекладу англійської анотації (в Google Translate та ін.) стаття буде повернута на доопрацювання!!!

В окремому файлі подаються відомості про авторів у вигляді анкети:

(Анкети подаються **3 мовами (укр., англ. та рос.)**. Вказується повна назва організації або установки, вказати місце де працює автор. Якщо всі автори статті працюють або навчаються в одній установі, можна не вказувати місце роботи кожного автора окремо.)

Прізвище, ім'я, по-батькові автора (повністю, без скорочень)	
Вчений ступінь, вчене звання, посада	
Місце роботи кожного автора в називному відмінку (повна назва без скорочень)	
Поштова адреса місця роботи, з поштовим індексом	
Контактний телефон	
Електронна адреса	
ORCID	

Відповідальність за зміст статті несуть автори. Остаточне рішення щодо друку статей ухвалює редколегія. Редакція залишає за собою право проводити редакційну правку статей.

Редакція журналу здійснює перевірку на плагіат за допомогою спеціального програмного забезпечення!!!

Статті, які не відповідають вимогам редакції журналу "Енергетика: економіка, технології, екологія" та не пройшли перевірку на плагіат, будуть повернуті на доопрацювання.

Увага!!! На електронну адресу журналу надсилається:

- стаття версія в форматі *.doc або *.docx;
- стаття версія в форматі *.pdf (**ОБОВ'ЯЗКОВО**);
- анкета відомостей про авторів;
- акт експертизи про можливість оприлюднення матеріалів у засобах масової інформації.

Контакти:

- тел.: +38(044) 204-82-37;
- сайт: <http://energy.kpi.ua>;
- e-mail: kravkpi@ukr.net