

**144 ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКА**

УДК 621.311.22

DOI: 10.31498/2225-6733.51.2025.344889

**МОДЕРНІЗАЦІЯ ТУРБОВІТРОДУВОК ТЕЦ: ТЕХНІЧНІ АСПЕКТИ ЗАМІНИ КОМПРЕСОРА****Ялова А.М.**канд. техн. наук, доцент, Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0926-542X>, e-mail: [al.yalovaya@knu.edu.ua](mailto:al.yalovaya@knu.edu.ua);**Бондар Н.В.**ст. викладач, Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8713-265X>, e-mail: [bondar\\_nv@knu.edu.ua](mailto:bondar_nv@knu.edu.ua)

**Мета дослідження.** Метою дослідження є оцінка можливості заміни компресора для забезпечення подачі дуття з необхідними параметрами на доменну піч - 9, стабільної роботи доменної печі та гарантованого обсягу дуття на ДП-9 під час подальшої реконструкції повітродувки. **Матеріали і методи.** Для проведення дослідження були використані дані про існуючі параметри компресорної установки та її характеристики, зокрема параметри роботи компресора, які визначають необхідні умови для стабільної роботи системи дуття на ДП-9. У дослідженні було застосовано метод аналізу технічних характеристик компресорних установок: для порівняння різних моделей компресорів були зібрані технічні характеристики існуючого компресора та можливих кандидатів на заміну. Порівнювались параметри ефективності, потужності, енергоспоживання, а також вплив на стабільність роботи печі. Порівняння результатів до та після заміни – для оцінки впливу заміни компресора на систему в цілому використовувалися методи статистичного аналізу, що дозволило виявити зміни в енергоефективності, стабільності роботи та витратах на обслуговування установки. **Результати.** Наукова новизна дослідження полягає в розробці та впровадженні методики заміни компресора в компресорній установці для забезпечення стабільної роботи системи дуття на ДП-9 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг». Вперше виявлено та обґрунтовано, що заміна компресора з урахуванням новітніх моделей дозволяє не лише оптимізувати параметри дуття, але й знизити енергоспоживання та підвищити ефективність роботи компресорної установки в умовах підвищених навантажень. Дослідження також включає комплексний аналіз впливу модернізації на систему проміжного охолодження та виявлення нових аспектів, що сприяють стабільності і довговічності роботи установки в умовах реконструкції. **Практичне значення.** Практичне значення дослідження полягає в розробці рекомендацій щодо заміни компресора в компресорних установках для забезпечення стабільної роботи системи дуття на ДП-9. Заміна компресора дозволяє значно підвищити енергоефективність процесу, зменшити енергоспоживання та знизити витрати на обслуговування обладнання. Впровадження запропонованих рішень дає змогу забезпечити безперебійну та стабільну роботу доменної печі, що важливо для підтримки високої продуктивності та якості продукції. Крім того, розроблені методи можуть бути використані для реконструкції та модернізації інших промислових установок, що дозволяє підвищити загальну ефективність виробничих процесів.

**Ключові слова:** компресорна установка, реконструкція, турбовітродувка, турбіна, теплоелектроцентрально.

**Постановка проблеми**

Сучасний етап розвитку характеризується стрімким зростанням вартості енергоресурсів, що зумовлює підвищену увагу до питань енергозбереження та енергоефективності в промисловій теплоенергетиці. Забезпечення раціонального використання енергоресурсів є актуальним завданням для будь-якого промислового підприємства, особливо для тих, що виробляють енергоємну продукцію. Однією з основних проблем сучасної та перспективної діяльності теплоенергетичного обладнання металургійних підприємств є швидке збільшення зносу обладнання, який вже досяг 60%, 52% обладнання теплоелектроцентралів відпрацювало від 30 до 50 років, а 7% – понад 50 років. Компресори в системі доменної печі забезпечують подачу стисненого повітря, необхідного для процесу горіння коксу та відновлення заліза. Вони сприяють досягненню високих температур у печі та ефективному протіканню хімічних реакцій. Зазначене зниження надійності роботи компресорних установок обумовлене високим зносом

основного обладнання та відсутністю необхідних інвестицій для їх масштабного та своєчасного оновлення. Стратегічними цілями розвитку компресорних систем є забезпечення надійності, ефективності та безпеки їх роботи. Актуальною проблемою на сьогодні є необхідність зниження виробничих витрат при забезпеченні стабільної та ефективної роботи доменної печі №9 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг». В умовах, коли робота здійснюється з противибуховими перепусками, виникає потреба в модернізації системи подачі дуття. Існуюче обладнання не забезпечує необхідну продуктивність, що ставить під загрозу досягнення запланованих показників виробництва чавуну на рівні 9000 тон на добу. Це зумовлює необхідність заміни застарілого компресора на новий, більш потужний агрегат, здатний забезпечити понад 9000 м³/хв дуття. У зв'язку з цим проблема заміни компресорного обладнання залишається актуальною.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій**

У контексті підвищення енергоефективності металургійного виробництва важливою є проблема оптимізації роботи промислових компресорів, які забезпечують пневматичне обладнання, системи охолодження та інші технологічні процеси. Сучасні дослідження вказують на значний потенціал енергозбереження за рахунок модернізації компресорного обладнання, автоматизації його роботи та впровадження прогностичного технічного обслуговування, а також реконструкції та заміни застарілого обладнання.

Вітчизняні науковці приділяють увагу підвищенню ефективності експлуатації компресорів через реконструкцію існуючих систем. У статті Кравченко В.П. [1] розглядається підвищення ефективності та надійності систем подачі дуття в доменному виробництві, зокрема при використанні загальних колекторів для групи доменних печей. Увага приділяється математичному моделюванню процесів, що відбуваються в системах дуття, оптимізації режимів роботи турбокомпресорів, забезпеченню стабільного тиску та зниженню енерговитрат. Особливе значення має розробка моделей, здатних враховувати динамічну взаємодію між джерелами дуття та споживачами при змінних технологічних навантаженнях, що дозволяє підвищити техніко-економічну ефективність роботи доменних агрегатів.

У роботі Кошельнік О.В. [2] розглядається перспективна схема утилізації теплоти димових газів від регенеративних повітрянагрівачів доменних печей шляхом впровадження енерготехнологічного комплексу, ключовими елементами якого є турбоустановка з електрогенератором та термосорбційний компресор. Саме термосорбційний компресор забезпечує необхідні параметри робочого тіла перед подачею до турбіни, що дозволяє ефективно використовувати низькопотенційну теплоту. Дослідження підтвердили, що використання системи регенерації теплоти підвищують термодинамічну досконалість комплексу до 5%.

На міжнародному рівні спостерігається активне впровадження цифрових технологій у діагностику та обслуговування компресорів. У роботі Costa A. та ін. [3] описано використання гібридних моделей кластеризації для прогнозування технічного стану високонадірних компресорів. Запропоновані алгоритми дозволяють мінімізувати простой та знижують витрати на ремонт.

Крім того, у дослідженні Jakubowski J. та співавт. [4] наведено огляд сучасних методів штучного інтелекту, які застосовуються для управління компресорним обладнанням на підприємствах сталеливарної промисловості. Основна увага приділена методам обробки потокових даних із сенсорів, виявленню аномалій та оптимізації графіків обслуговування.

Також дослідження [5] присвячене підвищенню енергоефективності багатоступеневих компресорних систем шляхом врахування реальної (змінної)

ефективності теплообмінників при охолодженні між ступенями. Автори розробили математичну модель, яка враховує вплив температури довкілля на ефективність інтеркулера, і довели, що традиційні підходи з фіксованими коефіцієнтами можуть призводити до завищених енергетичних витрат.

У дослідженні [6] розглянуто модель оптимального проектування багатоступеневого компресора зі сталою геометрією проточного тракту, а у дослідженні [7] увагу приділяють турбокомпресорам зі змінною геометрією як засіб підвищення ефективності наддуву та рекуперації енергії вихлопних газів.

Дослідження [8, 9] присвячені оптимізації конструкції сильно навантаженого осьового компресора за допомогою аеродинамічного моделювання та генетичних алгоритмів. У дослідженні використано параметричне представлення лопатей за допомогою Bézier-кривих для досягнення мінімального рівня втрат і підвищення стабільності потоку при високих навантаженнях. Результати показали, що запропонований метод дозволяє істотно знизити втрати потоку та покращити стійкість компресора до зсувів режимів роботи, що є ключовим для високопродуктивних газотурбінних установок. А у дослідженні [10] розглянуто підхід до попередньої оптимізації багатоступеневих осьових промислових компресорів із застосуванням принципів, запозичених із практики проектування авіаційних компресорів. Такий підхід передбачає використання емпіричних залежностей, характерних для авіаційної галузі, зокрема оптимальні значення відношення товщини до хорди, ступеня завантаження, кута атаки та геометричних співвідношень лопаток. У [11] встановлено залежність між варіаціями кута нахилу лопатки ротора, що виникають унаслідок деформацій профілю лопатки компресора, та змїною величини потужності, необхідної для його роботи.

У роботах [12, 13] запропоновано застосування нелінійного керування для відцентрових компресорів з урахуванням промислових вимог, зокрема адаптації до змін навантаження та дотримання обмежень, таких як запобігання помпажу та діагностика несправностей у прогнозованому обслуговуванні. Модифіковано модель Гравдаля-Егеланна для точнішого відображення реальних умов, а також реалізовано керування вихідною потужністю на основі внутрішньої моделі у поєднанні з MIN/MAX-регулюванням. Додатково проаналізовано стійкість системи та ефективність перемикавання режимів, а ефективність підходу продемонстровано на прикладі керування тиском, захисту від помпажу та обмеження максимального тиску.

Отже, аналіз сучасних джерел показує, що напрямки удосконалення промислових компресорів на металургійних підприємствах є актуальним як для вітчизняної, так і для зарубіжної науки. Перевага надається комплексному підходу, що охоплює технічну модернізацію, автоматизацію та інтеграцію інтелектуальних систем управління.

**Мета статті**

Метою даної роботи є дослідження та оцінка можливості заміни компресора для забезпечення подачі дуття з необхідними параметрами на доменну піч - 9, стабільної роботи доменної печі та гарантованого обсягу дуття на ДП-9 під час подальшої реконструкції повітродувки.

**Виклад основного матеріалу**

Згідно з даними Офісу з розвитку підприємництва та експорту [14], у 2021 році металургійна продукція залишалася основною статтею експорту України. Обсяг експорту чорних металів та виробів з них досяг 15,98 млрд доларів США, що на 77% перевищує показник 2020 року. За підсумками 2021 року, виробництво сталі в Україні зросло на 3,3% порівняно з попереднім роком, досягнувши 21,3 млн тонн. Виплавка чавуну також збільшилася на 3,3%, склавши 21,1 млн тонн, а виробництво металопродукату зросло на 3,3%, до 19,04 млн тонн. У січні-листопаді 2021 року Україна посіла 10-те місце у світовому рейтингу виробників чавуну, виплавивши 19,44 млн тонн, що на 4,5% більше, ніж за аналогічний період 2020 року. У виробництві сталі Україна зайняла 14-те місце, виплавивши 19,62 млн тонн, що на 4,9% перевищує показник січня-листопада 2020 року. Виробництво чавуну та сталі є надзвичайно енергоємними процесами, які спричиняють 7-9% прямих викидів CO<sub>2</sub> від глобального використання викопного палива. За даними Міжнародного енергетичного агентства, серед важких промислових галузей виробництво чавуну та сталі є другим за величиною споживачем енергії. Хоча енергоспоживання на виробництво однієї тонни сталі знизилося за останні 50 років на 60%, повністю уникнути енергоспоживання неможливо і шляхів розвитку залишається досить багато. Отже, для зменшення споживання енергії у металургійній галузі необхідно впроваджувати цілеспрямовані заходи з підвищення енергоефективності та покращення роботи технологічного обладнання. У 2020 року Міжнародна енергетична агенція (МЕА) оприлюднила дорожню карту для пріоритетних технологій виробництва чавуну та сталі [15]. У цьому звіті визначено технології та стратегії, необхідні для металургійної галузі, щоб забезпечити її розвиток у рамках більш загального бачення МЕА щодо сталого енергетичного прогресу. У звіті аналізується потенціал підвищення енергоефективності, включаючи збільшення використання вторинних енергоресурсів та зменшення енергоспоживання. МЕА підкреслює важливість сталі для економіки. Хоча підвищення енергоефективності є важливим кроком для галузі, необхідно також активно розвивати і впроваджувати широкий спектр інноваційних технологій та інфраструктури.

Компресорне обладнання є одним із ключових елементів промислової інфраструктури металургійного виробництва. Воно забезпечує стиснене повітря для пневматичних систем, енергопостачання агрегатів,

охолодження та інші технологічні процеси. У зв'язку з високим енергоспоживанням і навантаженням на систему електропостачання, актуальним є питання модернізації застарілих компресорів та впровадження енергоефективних технологій. Металургійні підприємства України мають поодинокую практику заміни компресорного обладнання. У 2020 році у компресорній ЦТК-2 теплосилового цеху ПрАТ «Маріупольський металургійний комбінат» експлуатувалися два турбокомпресори К-500 продуктивністю по 500 м<sup>3</sup>/хв кожен. Обладнання використовувалося для виробництва стисненого повітря та подачі його в загальнозаводську мережу для підтримки системного тиску. Відцентрові компресори, спроектовані ще в 60-х роках минулого століття, значно поступаються енергоефективності сучасного обладнання. Висока питома споживана потужність і відсутність системи регулювання продуктивності призводили до нераціонального споживання електроенергії теплосиловим цехом. Для подачі в пневмомережу підприємства аналогічного обсягу стисненого повітря фахівці ТОВ «Далгакиран компресор Україна» запропонували використовувати три відцентрових компресора TRX-170/1700 виробництва ІНІ-DALGAKIRAN (Японія-Туреччина). Поставлені турбокомпресори з продуктивністю 345 м<sup>3</sup>/хв кожен сумарно споживають 5100 кВт електроенергії, що на 20% менше споживання старим компресорним обладнанням.

У 2018 році ПАТ «Арселор Міттал Кривий Ріг» уклало контракт на постачання повітродувки Siemens STC-GV (160-3) для обслуговування доменної печі №9, найбільшої на підприємстві. Загальна вартість угоди перевищила 13 млн доларів США. Введення в експлуатацію нової повітродувки з електроприводом (ЕВД-1) мало на меті збільшити обсяги виробництва чавуну на доменній печі №9 та зменшити викиди CO<sub>2</sub> на 30,5 тис. тонн на рік, завдяки економії природного газу. Нове обладнання забезпечило стабільну подачу холодного дуття з ТЕЦ-3 підприємства. Проект передбачав співпрацю з німецьким та українським підрозділами компанії Siemens. Згідно з умовами угоди, компресор ЕВД-1 був поставлений німецьким представництвом Siemens, а електродвигун та систему плавного пуску – «Сіменс Україна». Продуктивність обладнання становила 4 800 м<sup>3</sup>/хв, а номінальна потужність електродвигуна – 26,5 МВт. Термін постачання обладнання був запланований на квітень 2019 року. На той час у ПАТ «Арселор Міттал Кривий Ріг» експлуатувалися десять турбоповітродувки: сім обслуговували доменні печі доменного цеху №1, а три – доменного цеху №2. Обладнання, що обслуговувало доменну піч №9, складалося з трьох турбоповітродувки (ТВД-12, 13, 14). Одна з цих турбоповітродувки була замінена на нову з електроприводом, а в подальшому планувалося модернізація інших. Для зниження витрат виробництва в режимах, що передбачають протитисковий перепад, була передбачена схема з підключенням до подачі дуття додаткової повітродувки ТК-15. З цією метою передбачається

заміна компресора К-3000-61-1 ТК-15 на компресор К-5500-42-1 ТВД-3А, продуктивністю 4 200 м<sup>3</sup>/хв. Планована продуктивність ДП-9 у перспективі становила 9 000 тонн чавуну на добу, що повинно було забезпечуватися більш ніж 9 000 м<sup>3</sup>/хв дуття. Річна виробка дуття становитиме 2016000 тон·нм<sup>3</sup>. Річна потреба в парі становить 514400 тон, в кисні 380000 тон·нм<sup>3</sup>, у воді: зворотній цикл на охолодження ТК-15 – 44640 тис.м<sup>3</sup>, підживлення оборотного циклу ТК-15 – 232,2 тис.м<sup>3</sup>.

Турбоповітродувка ТК-15 розташована в турбінному цеху №3 головного корпусу ТЕЦ-3 і знаходиться на території металургійного підприємства ПАТ

«АрселорМіттал Кривий Ріг». Турбоповітродувка ТК-15 (компресор К-3000-61-1 та парова турбіна ВКВ-22-1) виготовлена у 1982 році (заводський №6723). Об'єкт перебуває на балансі ТЕЦ-3 і обслуговується персоналом турбінного цеху ТЕЦ-3. Метою заміни обладнання ТК-15 є зниження витрат виробництва та експлуатація компресорів в режимах без помпажу, а також запобігання ризикам, пов'язаним з можливим виходом з ладу ТВД ТЕЦ-3 та зупинкою ДП-9 у разі відключення ТЕЦ-3.

Парова турбіна ВКВ-22-1 є типовим представником парових турбін промислового призначення.

Таблиця 1

Технічні характеристики парової турбіни ВКВ-22-1

| № | Найменування величини                                    | Одиниці виміру                             | Значення величин |                  |                  |
|---|----------------------------------------------------------|--------------------------------------------|------------------|------------------|------------------|
|   |                                                          |                                            | Режим 1          | Режим 2          | Режим макс.      |
| 1 | Потужність на муфті                                      | кВт                                        | 15000            | 17200            | 20500            |
| 2 | Частота обертання                                        | с <sup>-1</sup><br>(об/хв)                 | 55<br>(3300)     | 57,3<br>(3440)   | 58,3<br>(3500)   |
| 3 | Витрати свіжої пари (при увімкнених ПНД)                 | кг/с<br>(т/год)                            | 15,7<br>(56,5)   | 17,7<br>(64,3)   | 21,1<br>(76,0)   |
| 4 | Температура підігріву конденсату в ПНД                   | °C                                         | 148              | 152              | 157              |
| 5 | Температура охолоджувальної води при вході в конденсатор | °C                                         | 25               | 25               | 25               |
| 6 | Кількість охолоджувальної води                           | м <sup>3</sup> /с<br>(м <sup>3</sup> /год) | 251,36<br>(4900) | 251,36<br>(4900) | 251,36<br>(4900) |

Турбінний цех ТЕЦ-3 призначений для забезпечення холодним дуттям доменної печі №9 і є єдиним технологічним комплексом, що складається з:

- ТВД №12, 13, 14 з компресорами К-7000, проектною продуктивністю 5500 нм<sup>3</sup>/хв кожна (встановлені в 1974-75 роках);

- ТК-15 з компресором К-3000, продуктивністю 3000 нм<sup>3</sup>/хв та турбіною ВКВ-22 (встановлена в 1982 році);

- система інженерних комунікацій, автоматичного управління, траси енергетичних носіїв (циркуляційні водоводи, кисневі трубопроводи, маслопроводи), системи АСУТП, протипожежної, охоронної та інших сигналізацій.

На даний час ТВД №12, 13, 14 перебувають в експлуатації, проте їх стан оцінюється як надзвичайно незадовільний. Обстеження цих повітродувок показали, що стінки цих агрегатів мають значний знос, також є тріщини в сопловій коробці, механічні пошкодження, руйнування лопатей, значна корозія на дисках та інше.

Фактична продуктивність значно знижена з 5500 нм<sup>3</sup>/хв до 4600 нм<sup>3</sup>/хв.

Повітродувка ТК-15 введена в експлуатацію в 1982 році та розрахована на проектну продуктивність 3000 нм<sup>3</sup>/хв. Спочатку ця повітродувка була встановлена для забезпечення стисненим повітрям кисневого блоку КТ-70, де були необхідні параметри подачі повітря, що відрізняються від параметрів дуття на ДП-9. Пізніше, після закриття блоку, необхідність у використанні цієї повітродувки для подачі стисненого повітря на кисневе виробництво відпала, і вона була перепідключена до подачі дуття на ДП-9.

Агрегат не подає дуття на ДП-9 і перебуває в резерві через несумісність необхідних параметрів дуття для ДП-9 та параметрів компресора К-3000 цієї повітродувки (робочий тиск 6 кгс/см<sup>2</sup>, при необхідному - 4,2 кгс/см<sup>2</sup>).

Для забезпечення необхідного витрату дуття, паралельно експлуатуються два компресори залежно від кліматичних умов та режиму роботи печі №9.

Введення в експлуатацію повітродувки ТК-15 після заміни компресора дозволить подавати дуття з необхідними параметрами на ДП-9, забезпечити стабільну роботу печі, а також забезпечити необхідний обсяг дуття на ДП-9 під час подальшої реконструкції ТВД №12, 13, 14. Для кількісної оцінки надійності енергетичного обладнання застосовуються як окремі, так і інтегральні показники. Окремі показники надійності характеризують специфічні властивості технічного стану обладнання і зазвичай включають такі параметри, як інтенсивність відмов, середній час напрацювання на відмову, а також середній час відновлення. Інтегральні показники охоплюють сукупність характеристик надійності та застосовуються для комплексної оцінки технічного стану обладнання. До таких показників відносяться коефіцієнти готовності, технічного

використання, непланових відмов, а також коефіцієнти використання встановленої потужності.

Для практичного обчислення цих показників в межах одного календарного року фіксуються такі експлуатаційні дані, як сумарний час напрацювання обладнання, тривалість його перебування в ремонті, а також періоди вимушених простоїв. На основі цих даних проводиться відповідний розрахунок, що дозволяє оцінити ефективність роботи і надійність компресорного обладнання на ТЕЦ.

У складі ТК №15 після заміни передбачені компресор типу К-5500-42-1 та привідна парова турбіна типу ВКВ-22, що працює в конденсаційному режимі та забезпечує подачу дуття (збагаченого киснем) на ДП-9 (рис. 1).

Схема турбоповітродувки ТК №15

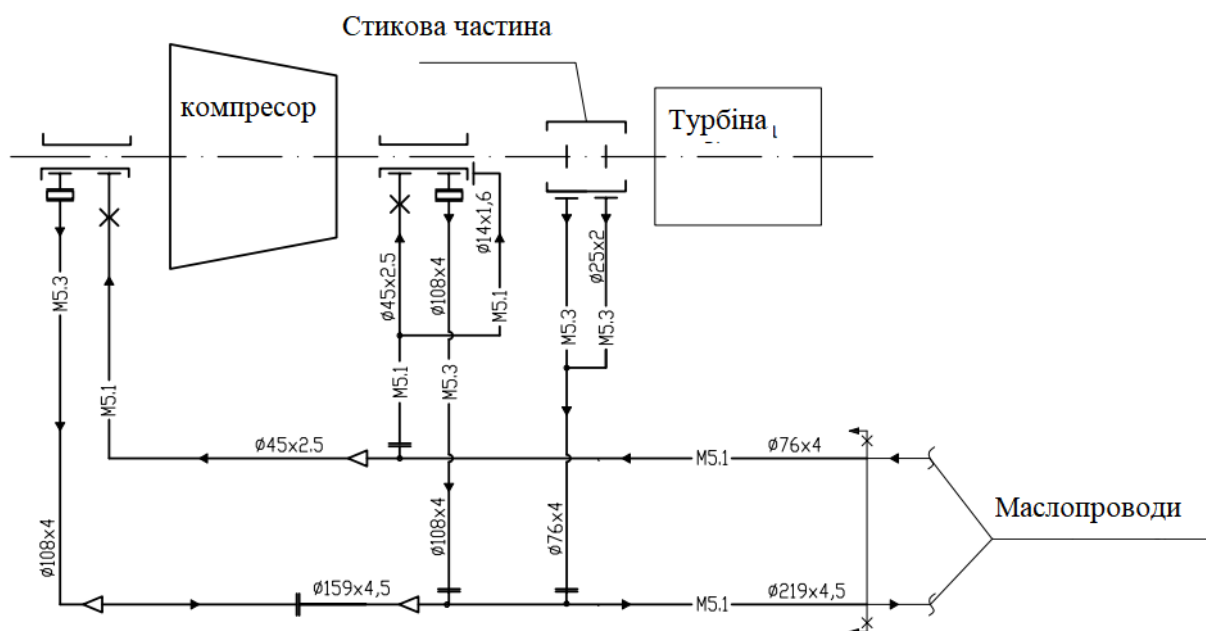


Рис. 1 – Схема ТК №15

Запропонований до встановлення комплект теплоенергетичного обладнання складається з компресора, проміжного повітроохолоджувача, водяний фільтр (грязьовик). Компресор типу К-5500-42-1 виконаний відцентрового типу одноциліндровим.

Будова компресора має з чотири ступені стиснення, розподілених на дві секції низького та високого тиску, які розділені повітроохолоджувачем. У першій секції обидві ступені стиснення виконані двопоточними, у другій секції – однопоточними. Технічна характеристика компресора К-5500-42-1 наведена в таблиці 2. Проміжний повітроохолоджувач типу ВОТ-2000 є поверхневим з ребристими трубками, призначений для

зниження температури повітря перед другою секцією стиснення компресора з метою підвищення економічності агрегату. На лінії подачі циркуляційної води до проміжного повітроохолоджувача встановлений вертикальний водяний фільтр (грязьовик) Ду 350, призначений для очищення води від забруднень.

Під час проведення аналізу з питання заміни компресора на більш потужний було враховано ключові показники ефективності та надійності (енергетичні витрати, здатність нового компресора до забезпечення необхідних параметрів тиску і потужності, а також економічні та технічні показники).

Таблиця 2

Технічна характеристика компресора К-5500-42-1

| № | Найменування величини                                                                                                    | Одиниці виміру           | Значення величин        |                         |
|---|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|
|   |                                                                                                                          |                          | Режим 1                 | Режим 2                 |
| 1 | Продуктивність, віднесена до 20°C та 0,1013 МПа (760 мм.рт.ст.)                                                          | м³/с (м³/хв)             | 61 (3660)               | 70 (4200)               |
| 2 | Об'ємна продуктивність при початкових умовах                                                                             | м³/с (м³/хв)             | 63 (3780)               | 72,5 (4350)             |
| 3 | Кінцевий тиск                                                                                                            | МПа (кгс/см²)            | 0,412 (4,2)             | 0,412 (4,2)             |
| 4 | Потужність                                                                                                               | кВт                      | 15000                   | 17200                   |
| 5 | Частота обертання ротора                                                                                                 | с⁻¹                      | 55 (3300)               | 57,3 (3440)             |
| 6 | Початкові умови стану повітря при вході до компресора:<br>- Тиск, абсолютний;<br>- Температура;<br>- Відносна вологість. | МПа (кгс/см²)<br>°C<br>% | 0,098 (1,0)<br>20<br>50 | 0,098 (1,0)<br>20<br>50 |
| 7 | Температура охолоджувальної води при вході в охолоджувач повітря                                                         | °C                       | 25                      | 25                      |
| 8 | Витрата охолоджувальної води на проміжний охолоджувач повітря                                                            | м³/с (м³/год)            | 0,167 (600)             | 0,167 (600)             |

Коефіцієнт ефективності компресора (КЕ). Цей показник визначає, як ефективно компресор перетворює споживану електричну енергію в механічну енергію.

$$KE = \frac{P_{\text{спож}}}{P_{\text{пер}}} \quad (1)$$

де  $P_{\text{пер}}$  – потужність, передана в стиснуте повітря (кВт),

$P_{\text{спож}}$  – потужність, спожита компресором (кВт).

Специфічна витрата енергії (СВЕ). Цей показник дозволяє оцінити енергетичні витрати на одиницю стиснутого повітря, що виробляється компресором.

$$CBE = \frac{P_{\text{спож}}}{V_{\text{потік}}}, \quad (2)$$

$V_{\text{потік}}$  – об'єм стиснутого повітря, що подається компресором (м³/год).

Коефіцієнт використання потужності (КВП). Цей коефіцієнт показує наскільки ефективно використовується встановлена потужність компресора.

$$KBP = \frac{P_{\text{спр}}}{P_{\text{макс}}}, \quad (3)$$

де  $P_{\text{спр}}$  – фактична потужність, що використовується для роботи (кВт),

$P_{\text{макс}}$  – максимальна потужність компресора (кВт).

Індекс надійності компресора (ІН). Індекс надійності дозволяє оцінити надійність компресора в процесі експлуатації та передбачити можливі непередбачувані відмови або необхідність в ремонтах.

$$IN = \frac{T_{\text{б.р.}}}{T_{\text{рем}}}, \quad (4)$$

де  $T_{\text{б.р.}}$  – час безвідмовної роботи компресора,

$T_{\text{рем}}$  – час, що витрачається на ремонт.

Витрати на технічне обслуговування (ТО). При порівнянні старого компресора з новим важливо врахувати витрати на його обслуговування. Це може включати витрати на планові та аварійні ремонти, заміну деталей тощо.

$$TO = C_{\text{рем}} + C_{\text{з.ч.}} + C_{\text{перс}}, \quad (5)$$

де  $C_{\text{рем}}$  – витрати на поточні ремонти (грн/рік),

$C_{\text{з.ч.}}$  – витрати на запасні частини (грн/рік),

$C_{\text{перс}}$  – витрати на обслуговуючий персонал (грн/рік).

Нова потужність компресора для доменного виробництва. Для вибору нового компресора важливо врахувати потреби в стиснутому повітрі для доменного виробництва, які часто вимірюються в кубічних метрах за годину (м³/год).

$$V_n = V_{\text{ст}} \cdot \frac{P_n}{P_{\text{ст}}}, \quad (6)$$

де  $V_n$  – об'єм стиснутого повітря, що потрібен від нового компресора (м³/год),

$P_n$  – потужність нового компресора (кВт),

$P_{\text{ст}}$  – потужність старого компресора (кВт).

На існуючому турбокомпресорі ст. №15 К-3000-61-1, встановленому на ТЕЦ-ПВС №3 ПАТ «Арселор Міттал Кривий Ріг», в якості приводу використовується парова турбіна ВКВ-22-1. В якості приводу встановлюваного компресора К-5500-42-1 використовується цей же тип парової турбіни. Основними проектними рішеннями передбачено виготовлення проміжного валу для з'єднання існуючої парової турбіни з встановлюваним компресором. Також передбачені з'єднання системи маслопостачання компресора з існуючою системою маслопостачання парової турбіни.

Для встановлення компресора К-5500-42-1 використовується існуючий фундамент турбокомпресора ст. №15.

Для забезпечення охолодження конденсатора турбіни, маслоохолоджувачів та повітроохолоджувача ВОТ-2000 передбачаються демонтаж існуючих циркуляційних насосів Д-6300-27 та монтаж подаючих і скидаючих водоводів на ТК-15 від загальних подаючих і скидаючих колекторів циркуляційної води ТЕЦ-3. Для

забезпечення стабільної роботи компресора передбачена система протипомпажного регулювання і захисту.

Турбокомпресор К-5500-42-1, відповідно до своїх технічних характеристик, може забезпечити кількість повітря на дуття при роботі в парі з одним з існуючих турбокомпресорів ст.№12, 13, 14 як у номінальному,

так і в максимальному режимі. Крім того, установка зазначеного компресора дозволить знизити, при необхідності, виробництво дуття до 6000 нм<sup>3</sup>/хв без організації протипомпажного перепуску на компресорі К-7000-41-1. В таблицях 3-4 наведено параметри компресора до та після модернізації.

Таблиця 3

Параметри компресора до модернізації

| Найменування |                                                                                       | Розмірність             | Величина     |               |
|--------------|---------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|--------------|---------------|
|              |                                                                                       |                         | Режим роботи |               |
|              |                                                                                       |                         | номінальний  | максимальний. |
| 1            | Продуктивність віднесена до 20 °С та 101 кПа (1,033 кгс/см²)                          | нм³/с (нм³/хв)          | 50 (3000)    | 55 (3300)     |
| 2            | Об'ємна продуктивність за початкових умов                                             | нм³/с (нм³/хв)          | 53,3 (3200)  | 58,3 (3500)   |
| 3            | Кінцевий тиск                                                                         | МПа (кгс/см²)           | 0,56 (5,6)   | 0,61 (6,1)    |
| 4            | Споживана потужність                                                                  | кВт                     | 14250        | 17000         |
| 5            | Початковий тиск повітря при вході у всмоктувальний патрубок                           | кПа (кгс/см²)           | -3 (-0,03)   | -3 (-0,03)    |
| 6            | Початкова температура повітря                                                         | °С                      | 20           | 20            |
| 7            | Відносна вологість                                                                    | %                       | 50           | 50            |
| 8            | Температура охолоджувальної води при вході в проміжні та кінцеві охолоджувачі повітря | °С                      | 25           | 25            |
| 9            | Витрата охолоджувальної води на два проміжні повітроохолоджувачі                      | м³/с (м³/год)           | 0,28 (1000)  | 0,28 (1000)   |
| 10           | Частота обертання ротора компресора                                                   | с <sup>-1</sup> (об/хв) | 54,3 (3260)  | 56,7 (3400)   |

Таблиця 4

Параметри компресора після модернізації

| Найменування |                                                                                                                       | Розмірність              | Величина             |                      |
|--------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|----------------------|----------------------|
|              |                                                                                                                       |                          | Режим 1              | Режим 2              |
| 1            | Продуктивність масова                                                                                                 | кг/с (кг/хв)             | 73,1 (4388)          | 84,2 (5050)          |
| 2            | Об'ємна продуктивність за початкових умов                                                                             | м³/с (м³/хв)             | 63,0 (3780)          | 72,5 (4350)          |
| 3            | Кінцевий тиск                                                                                                         | МПа (кгс/см²)            | 0,41 (4,2)           | 0,41 (4,2)           |
| 4            | Споживана потужність                                                                                                  | кВт                      | 15000                | 17200                |
| 5            | Частота обертання ротора                                                                                              | с <sup>-1</sup> (об/хв)  | 55 (3300)            | 57,3 (3440)          |
| 6            | Початкові умови стану повітря при вході в компресор:<br>- тиск, абсолютний;<br>- температура;<br>- відносна вологість | кПа (кгс/см²)<br>°C<br>% | 98 (1,0)<br>20<br>50 | 98 (1,0)<br>20<br>50 |
| 7            | Температура охолоджувальної води при вході в охолоджувач повітря                                                      | °C                       | 25                   | 25                   |
| 8            | Витрата охолоджувальної води на проміжний охолоджувач повітря                                                         | м³/с (м³/год)            | 0,167 (600)          | 0,167 (600)          |

Питома витрата теплової енергії на виробництво дуття до введення в експлуатацію модернізованого агрегату – 0,2149-0,2475 Гкал/тис. нм<sup>3</sup>.

Питома витрата теплової енергії на виробництво дуття після введення в експлуатацію модернізованого агрегату – 0,1761 Гкал/тис. нм<sup>3</sup>.

Питома витрата теплової енергії на виробництво дуття на турбокомпресорах такого ж типу у ТЕЦ-2 – 0,1834 Гкал/тис.  $\text{м}^3$ .

Установлюваний агрегат, як за своїми характеристиками, так і за аеродинамічним розрахунком всмоктувального та нагнітального трактів, забезпечує тиск у станційному повітроводі для доменної печі №9 – 4,2 кгс/см<sup>2</sup> при номінальних та максимальних навантаженнях.

### Висновки

У ході проведеного дослідження та розрахунків було виявлено, що заміна старих компресорів на нові більш ефективні моделі забезпечує не лише зниження енергоспоживання, але й покращує надійність енергетичних систем. Використання нових компресорів дозволяє оптимізувати витрати на енергію, знижуючи операційні витрати та забезпечуючи стабільну роботу металургійних підприємств. Заміну старого компресора К-3000 на новий К-5500-42-1 слід розглядати як ефективний крок для підвищення надійності та енергоефективності системи подачі стисненого повітря на доменну піч №9 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг». Новий компресор здатний забезпечити необхідні параметри дуття, що значно підвищить стабільність роботи печі та зменшить ризики, пов'язані з можливими аваріями. Згідно з технічними даними, компресор має продуктивність від 3660  $\text{м}^3/\text{хв}$  до 4200  $\text{м}^3/\text{хв}$  при максимальному робочому тиску 4,2 кгс/см<sup>2</sup>. Це дає можливість забезпечити стабільну подачу дуття в необхідних обсягах для підтримки ефективної роботи доменної печі. Питома витрата теплової енергії на виробництво дуття до введення в експлуатацію модернізованого агрегату – 0,2149-0,2475 Гкал/тис.  $\text{м}^3$ . Питома витрата теплової енергії на виробництво дуття після введення в експлуатацію модернізованого агрегату – 0,1761 Гкал/тис.  $\text{м}^3$ . Встановлення компресора К-5500-42-1 дозволить знизити ймовірність аварійних зупинок, пов'язаних з відмовами старих агрегатів, таких як компресор К-3000. Це також зменшить періоди вимушених простоїв та поліпшить загальну ефективність роботи виробничих процесів на підприємстві. Використання нових компресорів та повітродувок дозволяє створити більш стабільну та ефективну енергетичну систему в рамках металургійного виробництва, що є важливим для підтримки надійного енергопостачання на підприємствах з високою енергоемністю. Отже, модернізація компресорного обладнання на базі компресора К-5500-42-1 є важливим кроком для підвищення енергоефективності, зниження викидів та забезпечення стабільної роботи доменних печей на підприємствах металургійної галузі.

### Перелік використаних джерел

- [1] Кравченко В. П. Математичне моделювання системи забезпечення дуттям групи доменних печей через загальний колектор. *Вісник Приазовського*

*Державного Технічного Університету. Серія: Технічні науки.* 2016. Вип. 32. С. 188-197.

- [2] Кошельнік О. В. Інтеграція водневих енергоперетворюючих систем в теплотехнологічні схеми доменного виробництва. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я (MicroCAD-2013): тези доп. 21-ї Міжнар. наук.-практ. конф., м. Харків, 29-31 травня 2013 р. Харків: НТУ «ХПІ», 2013. Ч. 1. С. 294.*
- [3] Predictive Maintenance Study for High-Pressure Industrial Compressors: Hybrid Clustering Models / A. Costa et al. *Hawaii International Conference on System Sciences*, Hawaii, USA, 7-10 January 2025. Pp. 992-1001. DOI: <http://dx.doi.org/10.24251/HICSS.2025.118>.
- [4] Artificial Intelligence Approaches for Predictive Maintenance in the Steel Industry: A Survey / J. Jakubowski et al. arXiv preprint. arXiv:2405.12785. 2024. DOI: <http://dx.doi.org/10.48550/arXiv.2405.12785>.
- [5] Azizifar S., Banooni S. Modeling and optimization of industrial multistage compressed air system using actual variable effectiveness in hot regions. *Advances in Mechanical Engineering*. 2016. Vol. 8(5). DOI: <https://doi.org/10.1177/1687814016647231>.
- [6] Design efficiency optimization of one-dimensional multi-stage axial-flow compressor / Chen L., Luo J., Sun F., Wu C. *Applied Energy*. 2008. Vol. 85, iss. 7. Pp. 625-633. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2007.10.003>.
- [7] Feneley A. J., Pesiridis A., Mahmoudzadeh Andwari A. Variable Geometry Turbocharger Technologies for Exhaust Energy Recovery and Boosting-A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. Vol. 71. Pp. 959-975. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.125>.
- [8] Optimization Design of a 2.5 Stage Highly Loaded Axial Compressor with a Bezier Surface Modeling Method / S. Huang et al. *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10(11). Article 3860. DOI: <https://doi.org/10.3390/app10113860>.
- [9] The Use of Sweep and Dihedral in Multistage Axial Flow Compressor Blading-Part I: University Research and Methods Development / S.J. Gallimore et al. *ASME Turbo Expo 2002: Power for Land, Sea, and Air*, Amsterdam, The Netherlands, 3-6 June 2002. Pp. 33-47. DOI: <https://doi.org/10.1115/GT2002-30328>.
- [10] Lei F., Zhang C. Preliminary Optimization of Multi-Stage Axial-Flow Industrial Process Compressors Using Aero-Engine Compressor Design Strategy. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11(19). Article 9248. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11199248>.
- [11] Rotor-blades' profile influence on a gas-turbine's compressor effectiveness / Lebele-Alawa B.T., Hart H.I., Ogaji S.O.T., Probert S.D. *Applied Energy*. 2008. Vol. 85, iss. 6. Pp. 494-505. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2007.12.001>.

- [12] Schulze R., Richter H. Model based MIN/MAX override control of centrifugal compressor systems. *Franklin Open*. 2024. Vol. 7. Article 100084. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fraope.2024.100084>.
- [13] El Hairech O., Lyhyaoui A. Fault detection and diagnosis in condition-based predictive maintenance. *International Conference on Advanced Intelligent Systems for Sustainable Development*, Ensam Rabat, Morocco, 22-27 May 2022. Pp. 296-301. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-031-35251-5\\_28](https://doi.org/10.1007/978-3-031-35251-5_28).
- [14] Найвищий обсяг експорту України у 2021 році має продукція металургії та аграрного сектору. URL: [https://me.gov.ua/News/Detail/a6910472-e124-4ce2-ba27-858bc3310932?lang=uk-UA&title=V2021-RotsiUkrainskiEkspoteriPokazaliNaibilshiPokaznik](https://me.gov.ua/News/Detail/a6910472-e124-4ce2-ba27-858bc3310932?lang=uk-UA&title=V2021-RotsiUkrainskiEkspoteriPokazaliNaibilshiPokaznikiZProdazhuZaKordonMetalivTaRoslinnoiProduktsii) (дата звернення: 06.01.2025).
- [15] International Energy Agency. Iron and Steel Technology Roadmap, October 2020. URL: <https://www.iea.org/reports/iron-and-steel-technology-roadmap> (дата звернення: 25.10.2024).

## MODERNIZATION OF CHP TURBO BLOWERS: TECHNICAL ASPECTS OF COMPRESSOR REPLACEMENT

**Yalova A.**

PhD (Engineering), associate professor, Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0926-542X>, e-mail: [al.yalovaya@knu.edu.ua](mailto:al.yalovaya@knu.edu.ua);

**Bondar N.**

senior lecturer, Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8713-265X>, e-mail: [bondar\\_nv@knu.edu.ua](mailto:bondar_nv@knu.edu.ua)

**Purpose of the study.** The objective of this study is to assess the feasibility of replacing the compressor to ensure the delivery of blast air with the required parameters to Blast Furnace No. 9 (BF-9), maintain stable furnace operation, and guarantee the necessary blast volume during the subsequent reconstruction of the blower system. **Materials and Methods.** The study utilized data on the existing parameters and characteristics of the compressor unit, particularly the compressor's operating parameters that determine the required conditions for the stable operation of the blast system at BF-9. The method of technical analysis of compressor units was applied: to compare various compressor models, technical specifications of the current compressor and potential replacement candidates were collected. Parameters such as efficiency, power, energy consumption, and their impact on furnace stability were compared. Statistical analysis methods were used to assess system performance before and after the compressor replacement, enabling the evaluation of changes in energy efficiency, operational stability, and maintenance costs. **Results.** The scientific novelty of the research lies in the development and implementation of a methodology for compressor replacement in the compressor unit to ensure the stable operation of the blast system for BF-9 PJSC «ArcelorMittal Kryvyi Rih». It was established and justified for the first time that replacing the compressor with a modern model not only optimizes blast parameters but also reduces energy consumption and increases the overall efficiency of the compressor unit under increased load conditions. The study also includes a comprehensive analysis of the impact of modernization on the intercooling system and identifies new factors contributing to the long-term stability and reliability of the unit during reconstruction. **Practical Significance.** The practical significance of this study lies in the development of recommendations for compressor replacement in compressor units to ensure stable operation of the blast system at BF-9. Compressor replacement significantly improves energy efficiency, reduces energy consumption, and lowers maintenance costs. The implementation of the proposed solutions ensures uninterrupted and stable operation of the blast furnace, which is crucial for maintaining high productivity and product quality. Moreover, the developed methods can be applied to the reconstruction and modernization of other industrial units, enhancing the overall efficiency of production processes.

**Keywords:** compressor unit, reconstruction, turbo blower, turbine, combined heat and power plant (CHP).

### References

- [1] V.P. Kravchenko, «Matematychnе modeliuвання system zabezpechennia duttiam hrupy domennykh pechei cherez zahalnyi kolektor» [«Mathematical modelling of the systems providing groups of blastfurnaces with blast via a common manifold»], *Visnyk Pryazovs'koho Derzhavnogo Tekhnichnogo Universytetu. Seriya: Tekhnichni Nauky – Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical sciences*, vol. 32, pp. 188-197, 2016. (Ukr.)
- [2] O.V. Koshelnik, «Intehratsiia vodnykh enerhopretvoriuiuchykh system v teplotekhnolohichni skhemy domennoho vyrobnytstva» [«Integration of water-based energy conversion systems into heat technology schemes of blast furnace generation»], in *Proc. of the 21-st Int. Sci.-Pract. Conf. «Information technologies: science, technology, technology, lighting, health» (MicroCAD-2013)*, Kharkiv, Ukraine, May 29-31, 2013, vol. 1, pp. 294. (Ukr.)

- [3] A. Costa, E. Mastriani, F. Incardona, K. Munari, and S. Spinello, «Predictive Maintenance Study for High-Pressure Industrial Compressors: Hybrid Clustering Models», in *Proc. of the Hawaii International Conference on System Sciences*, Hawaii, USA, Jan. 7-10, 2025, pp. 992-1001. doi: **10.24251/HICSS.2025.118**.
- [4] J. Jakubowski et al., «Artificial Intelligence Approaches for Predictive Maintenance in the Steel Industry: A Survey», 2024, *arXiv: 2405.12785*. doi: **10.48550/arXiv.2405.12785**.
- [5] S. Azizifar, and S. Banooni, «Modeling and optimization of industrial multistage compressed air system using actual variable effectiveness in hot regions», *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 8(5), 2016. doi: **10.1177/1687814016647231**.
- [6] L. Chen, J. Luo, F. Sun, and C. Wu, «Design efficiency optimization of one-dimensional multi-stage axial-flow compressor», *Applied Energy*, vol. 85, iss. 7, pp. 625-633, 2008. doi: **10.1016/j.apenergy.2007.10.003**.
- [7] A.J. Feneley, A. Pesiridis, and A. Mahmoudzadeh Andwari, «Variable Geometry Turbocharger Technologies for Exhaust Energy Recovery and Boosting-A Review», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 71, pp. 959-975, 2017. doi: **10.1016/j.rser.2016.12.125**.
- [8] S. Huang, J. Cheng, C. Yang, C. Zhou, S. Zhao, and X. Lu, «Optimization Design of a 2.5 Stage Highly Loaded Axial Compressor with a Bezier Surface Modeling Method», *Applied Sciences*, vol. 10(11), article 3860, 2020. doi: **10.3390/app10113860**.
- [9] S.J. Gallimore, J.J. Bolger, N.A. Cumpsty, M.J. Taylor, P.I. Wright, and J.M.M. Place, «The Use of Sweep and Dihedral in Multistage Axial Flow Compressor Blading-Part I: University Research and Methods Development», in *Proc. of the ASME Turbo Expo 2002: Power for Land, Sea, and Air*, Amsterdam, The Netherlands, June 3-6, 2002, pp. 33-47. doi: **10.1115/GT2002-30328**.
- [10] F. Lei, and C. Zhang, «Preliminary Optimization of Multi-Stage Axial-Flow Industrial Process Compressors Using Aero-Engine Compressor Design Strategy», *Applied Sciences*, vol. 11(19), article 9248, 2021. doi: **10.3390/app11199248**.
- [11] B.T. Lebele-Alawa, H.I. Hart, S.O.T. Ogaji, and S.D. Probert, «Rotor-blades' profile influence on a gas-turbine's compressor effectiveness», *Applied Energy*, vol. 85, iss. 6, pp. 494-505, 2008. doi: **10.1016/j.apenergy.2007.12.001**.
- [12] R. Schulze, and H. Richter, «Model based MIN/MAX override control of centrifugal compressor systems», *Franklin Open*, vol. 7, article 100084, 2024. doi: **10.1016/j.fraope.2024.100084**.
- [13] O. El Hairech, and A. Lyhyaoui, «Fault detection and diagnosis in condition-based predictive maintenance», in *Proc. of the International Conference on Advanced Intelligent Systems for Sustainable Development*, Ensam Rabat, Morocco, May 22-27, 2022, pp. 296-301. doi: **10.1007/978-3-031-35251-5\_28**.
- [14] Naivyshchyi obsiah eksportu Ukrainy u 2021 rotsi maie produktsiia metalurhii ta ahrarnoho sektoru (The greatest contribution to Ukraine's exports in 2021 comes from metallurgy and agricultural products). [Online]. Available: <https://me.gov.ua/News/Detail/a6910472-e124-4ce2-ba27-858bc3310932?lang=uk-UA&title=V2021-RotsiUkrainskiEksporterPokazaliNaibilshiPokaznikizProdazhuZaKordonMetalivTaRoslinnoiProduktsii>. Accessed on: January 06, 2025.
- [15] International Energy Agency. Iron and Steel Technology Roadmap, October 2020. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/iron-and-steel-technology-roadmap>. Accessed on: October 25, 2024.

Стаття надійшла 16.05.2025

Стаття прийнята 05.07.2025

Стаття опублікована 30.10.2025

**Цитуйте цю статтю як:** Ялова А. М., Бондар Н. В. Модернізація турбовітродувок ТЕЦ: технічні аспекти заміни компресора. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 51. С. 150-159. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.51.2025.344889>.