

*Д. Г. ВАСЮНІН, О. В. ЄФІМОВ, В. Л. КАВЕРЦЕВ*

### МОДЕРНІЗАЦІЯ ТА ДОСВІД ЕКСПЛУАТАЦІЇ ПАРОВИХ КОТЛІВ ЦКТИ-87/39 Ф2М СУМСЬКОЇ ТЕПЛОЕЛЕКТРОЦЕНТРАЛІ ПРИ ПЕРЕХОДІ НА НЕПРОЕКТНЕ ВУГІЛЛЯ ГАЗОВОЇ ГРУПИ

У статті розглянуто проблему адаптації теплогенеруючого обладнання теплоелектроцентралей України до роботи в умовах дефіциту проектних марок вугілля, що виник унаслідок втрати доступу до основних родовищ антрациту Донецького вугільного басейну після початку повномасштабної війни. Об'єктом дослідження є парові котли типу ЦКТИ-87/39 Ф2М, встановлені на Сумській теплоелектроцентралі, які були спроектовані для спалювання антрацитового штибу та вугілля марки «Т». У роботі розглянуто інженерні рішення, спрямовані на переведення зазначених котлоагрегатів на спалювання непроектного вугілля газової групи («Г» та «ДГ») в умовах нестабільного постачання палива. Проаналізовано основні фізико-хімічні відмінності антрацитового палива та вугілля газової групи, зокрема підвищений вміст легких речовин, змінність зольності та вологості, що істотно впливають на кінетику процесу горіння, роботу системи пилоприготування та тепловий режим топкового простору. Особливу увагу приділено особливостям експлуатації котлів із повітряною схемою транспортування пилу, яка при використанні газового вугілля висуває підвищені вимоги до температурного режиму сушіння та вибухобезпеки пилового тракту. Описано комплекс технічних заходів, реалізованих під час модернізації котлів Сумської ТЕЦ. До них належать реконструкція паливних пристроїв із оптимізацією подачі вторинного повітря, модернізація сепараторів системи пилоприготування, заміна робочих коліс млинових вентиляторів, оптимізація геометрії пилопроводів і газопроводів, а також посилення тягодуттєвого обладнання. Значну увагу приділено впровадженню заходів із підвищення пожежної та вибухової безпеки паливного тракту, зокрема герметизації пилових бункерів, контролю температури пилоповітряної суміші та застосуванню систем інертизації. Результати експлуатаційних спостережень протягом декількох опалювальних сезонів підтверджують можливість стабільної та безпечної роботи котлоагрегатів на непроектному паливі без зниження номінальної паропроductивності та збереження прийнятого рівня економічності. Показано, що реалізований комплекс інженерних рішень забезпечує надійне функціонування теплоелектроцентралі в умовах нестабільної паливної бази та підвищує гнучкість роботи обладнання. Отримані результати можуть бути використані під час модернізації котлоагрегатів середньої потужності, спроектованих для антрацитового палива, на інших теплоелектроцентралях України з метою підвищення енергетичної стійкості та диверсифікації паливних ресурсів.

**Ключові слова:** котлоагрегат ЦКТИ-87/39 Ф2М; теплоелектроцентрально; газове вугілля; непроектно паливо; пило приготування; модернізація котлів; енергетична безпека.

*D. VASIUNIN, O. YEFIMOV, V. KAVERTSEV*

### MODERNIZATION AND OPERATIONAL EXPERIENCE OF CKTI-87/39-F2M STEAM BOILERS DURING CONVERSION TO NON-DESIGN GAS-GRADE COAL

The article addresses the problem of adapting heat-generating equipment of Ukrainian combined heat and power plants (CHP plants) to operate under conditions of a shortage of design coal grades that arose after the loss of access to the main anthracite deposits of the Donetsk coal basin following the start of the full-scale invasion. The object of the study is the TsKTI-87/39-F2M steam boilers installed at the Sumy CHP plant, which were originally designed to burn anthracite and T-grade coal. The paper considers engineering solutions aimed at converting these boiler units to the combustion of non-design gas-grade coal (G and DG) under conditions of unstable fuel supply. The main physico-chemical differences between anthracite and gas-grade coal are analyzed, including the increased content of volatile matter and the variability of ash and moisture content, which significantly affect combustion kinetics, the operation of the pulverized coal preparation system, and the thermal conditions in the furnace. Particular attention is paid to the operation of boilers equipped with an air-based pulverized coal transportation system, which, when using gas-grade coal, imposes stricter requirements on the drying temperature regime and the explosion safety of the pulverized fuel system. A set of technical measures implemented during the modernization of the Sumy CHP boilers is described. These include the reconstruction of burner devices with optimization of secondary air supply, modernization of separators in the pulverizing system, replacement of mill fan impellers, optimization of the geometry of dust and gas pipelines, and reinforcement of draft equipment. Considerable attention is also given to measures aimed at improving fire and explosion safety of the fuel system, including sealing of pulverized coal bunkers, control of the temperature of the dust-air mixture, and implementation of inerting systems. The results of operational observations over several heating seasons confirm the possibility of stable and safe operation of boiler units on non-design fuel without reducing the rated steam capacity while maintaining an acceptable efficiency level. It is shown that the implemented set of engineering solutions ensures reliable operation of the CHP plant under conditions of an unstable fuel base and increases the operational flexibility of the equipment. The obtained results may be used in the modernization of medium-capacity boiler units originally designed for anthracite fuel at other CHP plants in Ukraine in order to improve energy security and diversify fuel resources.

**Key words:** TsKTI-87/39-F2M boiler unit; combined heat and power plant; gas-grade coal; non-design fuel; pulverized coal preparation; boiler modernization; energy security.

#### Вступ

Сучасний стан об'єднаної енергетичної системи (ОЕС) України характеризується критичною необхідністю адаптації теплових електростанцій та теплоелектроцентралей до роботи в умовах дефіциту проектних марок палива. Історично значна

частина генеруючих потужностей України, зокрема котлоагрегати типу ЦКТИ-87/39 Ф2М, була спроектована для спалювання антрацитових марок вугілля («АШ») та вугілля марки «Т» (пісного). Проте внаслідок повномасштабних військових дій та тимчасової втрати доступу до територій, де зосереджені основні родовища антрацитів Донецько-



© Д. Г. Васюнін, О. В. Єфімов, В. Л. Каверцев, 2026  
Дослідницька стаття. Ця стаття поширюється за міжнародною ліцензією Creative Commons Attribution (CC BY 4.0)

го вугільного басейну, постачання проектного палива стало неможливим.

Це створило реальну загрозу стабільному функціонуванню систем централізованого теплопостачання міст. Постала гостра науково-практична суперечність: необхідність забезпечення стабільної генерації при повній відсутності проектного палива та невідповідності існуючого обладнання фізико-хімічним властивостям доступного вугілля газової групи («Г», «ДГ»).

Дана робота безпосередньо пов'язана з реалізацією Енергетичної стратегії України, що передбачає забезпечення живучості енергосистеми та диверсифікацію паливних ресурсів. Вирішення завдання переведення котлів на непроектне паливо є стратегічним практичним завданням для вітчизняної енергетики, оскільки дозволяє мінімізувати залежність від дефіцитних імпортованих або недоступних ресурсів, використовувати внутрішній ресурсний потенціал вугілля газової групи (зокрема Львівсько-Волинського басейну) та гарантувати безперебійне тепло- та електропостачання обласних центрів (на прикладі м. Суми).

Дослідження досвіду реконструкції та експлуатації котлів Сумської ТЕЦ є важливим для формування загальнодержавної бази технічних рішень щодо модернізації застарілого парку котлоагрегатів середньої потужності в умовах обмежених часових та фінансових ресурсів.

#### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Питання переведення енергетичних котлів, спроектованих для спалювання вугілля марок «АШ» та «Т», на паливо газової групи активно досліджується українськими науковцями протягом останнього десятиліття. Значна увага у цих дослідженнях приділяється зміні паливної бази теплової енергетики України та адаптації існуючих енергетичних установок до використання альтернативних марок вугілля. Зокрема, у роботах М. О. Перова, В. М. Макарова та І. Ю. Новицького проаналізовано структуру споживання вугілля тепловими електростанціями України та визначено основні вимоги до якості енергетичного палива при зміні паливної бази [1]. Подібні питання розвитку паливно-енергетичного комплексу та трансформації структури паливних ресурсів розглядаються також у дослідженнях А.О.Капустянського та Г. Б. Варламова [2].

Значний внесок у дослідження процесів спалювання різних видів вугілля та адаптації енергетичних котлів до нових паливних умов зроблений у працях Н. І. Дунаєвської, Д. Л. Бондзика, М. М. Негаміна та інших авторів, зокрема розглядаються технології спільного спалювання різних видів твердого палива у пиловугільних котлах теплових електростанцій та теплоелектроцентралей, а також

аналізуються особливості процесів горіння палива з підвищеним вмістом летких речовин [3]. У роботах Н. І. Дунаєвської також висвітлено проблеми термічної переробки палив та підвищення ефективності їх використання в енергетичних установках теплових електростанцій [4].

Для розширення можливостей диверсифікації паливної бази та заміщення дефіцитного вугілля в теперішній час науковцями розглядаються також варіанти часткової інтеграції відновлюваних джерел енергії, зокрема біопалива [5], що підкреслює загальну тенденцію до гнучкості енергогенеруючих систем.

Питання технічної реконструкції котлів при переході з антрациту на газове вугілля розглядаються у дослідженнях М. Чернявського, А. Косячкова та А. Росколуپی, де запропоновано низку технічних рішень щодо модернізації котлоагрегатів теплових електростанцій із паропродуктивністю 220 – 250 т/год [6]. Отримані результати підтверджують можливість ефективного використання вугілля газової групи за умови модернізації основних вузлів котла та систем пилоприготування.

Окрему групу досліджень становлять роботи, присвячені удосконаленню процесів горіння та модернізації паливних пристроїв. Так, у працях С. Г. Кобзаря, О. І. Топала, Л. С. Гапонич та І.Л.Голенка досліджуються процеси сумісного спалювання різних видів палива та особливості організації процесу горіння в енергетичних установках [7]. У роботах С. Г. Кобзаря та А. А. Халатова також розглядаються питання зниження викидів оксидів азоту при ступеневому спалюванні палива у котлах теплових електростанцій [8].

Досвід реконструкції пиловугільних котлів при переході на інші види палива висвітлено також у роботі Д. С. Грязева, де розглянуто особливості модернізації котла типу ТП-100 при переході з антрацитового штибу на газове вугілля [9]. Додаткові аспекти використання альтернативних палив та підвищення ефективності процесів спалювання твердого палива розглядаються у дослідженнях І. Глікіної та Ю. Зубцова [10]. Питання підвищення енергоефективності теплогенеруючих установок та модернізації котельного обладнання систем централізованого теплопостачання розглянуті також у роботах П. М. Гламаздіна та Д. П. Гламаздіна [11].

Водночас аналіз наукових публікацій показує, що більшість досліджень присвячена реконструкції потужних енергетичних котлів теплових електростанцій, тоді як питання експлуатації котлоагрегатів середньої потужності типу ЦКТИ-87/39 Ф2М у специфічних умовах роботи теплоелектроцентралей висвітлено значно меншою мірою. На Сумській ТЕЦ застосовується повітряна схема підготовки та транспортування пилу, яка при використанні вугілля марок «Г» та «ДГ» висуває підви-

шені вимоги до забезпечення вибухобезпеки пилоповітряної суміші та контролю температурного режиму в системі пилоприготування. Невідповідність фактичної нижчої теплоти згоряння на робочу масу та зольності палива розрахунковим параметрам суттєво впливає на тепловий баланс котла та потребує коригування режимів його роботи [1], [2].

Таким чином, попри значну кількість теоретичних досліджень та практичних розробок щодо переведення енергетичних котлів на вугілля газової групи, питання модернізації та експлуатації котлоагрегатів середньої потужності типу ЦКТИ-87/39 Ф2М в умовах роботи теплоелектроцентралей залишаються недостатньо дослідженими. Дана стаття присвячена аналізу комплексу інженерних рішень, реалізованих при модернізації котлоагрегатів цього типу на Сумській ТЕЦ.

### Мета роботи

Метою статті є науково-технічне обґрунтування комплексу заходів з модернізації парових котлів типу ЦКТИ-87/39 Ф2М для переведення їх на спалювання непроєктного вугілля газової групи та аналіз досвіду їх експлуатації в умовах енергетичного дефіциту.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання: проаналізувати фізико-хімічні відмінності проектного антрацитового палива та вугілля марок «Г» і «ДГ» з точки зору їхнього впливу на роботу пилосистеми та топково-

го процесу; обґрунтувати необхідні конструктивні зміни в системі пилоприготування, зокрема реконструкцію сепараторів та заміну робочих коліс млинових вентиляторів для забезпечення необхідної тонини помелу пилу; описати технічні рішення щодо модернізації основних та скидних пальників, а також оптимізації діаметрів пилопроводів для підтримки стабільних швидкостей пилоповітряної суміші; визначити заходи з підвищення пожежної безпеки та герметизації паливного тракту, включаючи впровадження системи подачі інертних газів у пилові бункери; оцінити ефективність посилення тягодуттьових потужностей (модернізація димососів) для забезпечення проектного паропродуктивності котла при роботі на паливі з широким діапазоном характеристик.

### Виклад основного матеріалу дослідження

Об'єктом дослідження є парові котли типу ЦКТИ-87/39 Ф2М (на рис. 1), встановлені на Сумській теплоелектроцентралі. Вказані котлоагрегати належать до барабанних агрегатів із природною циркуляцією та призначені для виробництва перегрітої пари середнього тиску для потреб теплопостачання та виробництва електричної енергії. Номінальна паропродуктивність котла становить 87 т/год, тиск перегрітої пари – 3,9 МПа, температура перегрітої пари – до 450 °С. Основні технічні характеристики котлоагрегату та порівняльний аналіз фізико-хімічних властивостей проектного та непроєктного палива наведено в табл. 1.

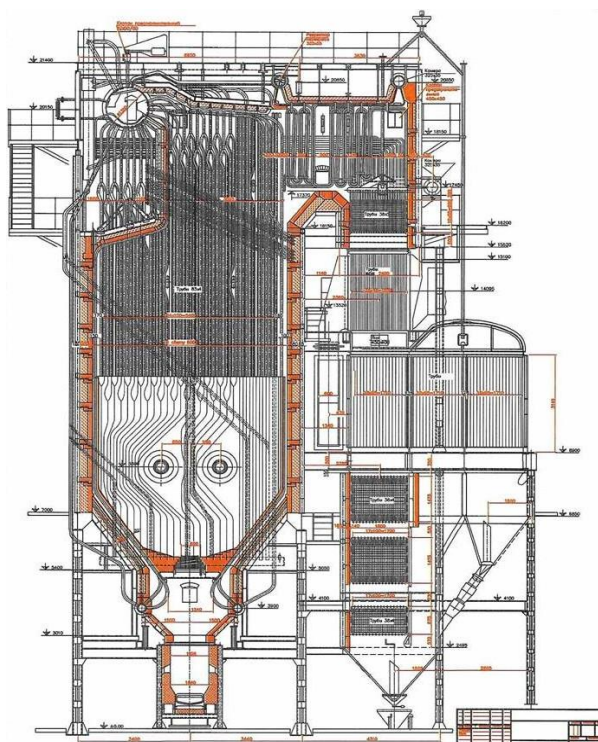


Рис. 1 – Паровий котел типу ЦКТИ-87/39 Ф2М

Проектним паливом для даного типу котлів є антрацитовий штиб, який характеризується низьким виходом летких речовин та відносно стабільними фізико-хімічними показниками. Конструкція топки, пальникових пристроїв, системи пилоприготування та тягодуттєвого обладнання була розрахована саме під спалювання антрациту. З огляду на це, перехід до спалювання непроектного палива – вугілля газової групи марок «Г» та «ДГ» – вимагав комплексного аналізу впливу зміни палива на всі основні технологічні процеси.



Рис. 2 – Вугілля газової групи

Таблиця 1 – Технічні характеристики об'єкта та порівняльні показники палива

| Параметр (характеристика)                      | Проектне паливо<br>(Антрацитовий штиб «АШ») | Непроектне паливо<br>(Вугілля марок «Г», «ДГ»)      |
|--|---|---|
| 1 Параметри котлоагрегату ЦКТИ-87/39 Ф2М:      |   |   |
| Номінальна паропродуктивність, т/год           | 87  | 87 (забезпечується після модернізації)              |
| Тиск перегрітої пари, МПа                      | 3,9   | 3,9   |
| Температура перегрітої пари, °С                | до 450                                      | до 450  |
| Тип циркуляції                                 | природна                                    | природна  |
| Конструктивне виконання                        | барабанний                                  | барабанний  |
| 2 Фізико-хімічні показники палива:             |   |   |
| Нижча теплота згоряння на робочу масу, ккал/кг | 5200 – 5500                                 | 4500 – 4900   |
| Вихід летких речовин на горючу масу, %         | 3,5 – 5,0 (низький)                         | 35,0 – 45,0 (високий)                               |
| Робоча зольність, %                            | 20,0 – 25,0 (стабільна)                     | 25,0 – 35,0 (висока, змінна)                        |
| Робоча вологість, %                            | 7,0 – 8,5 (стабільна)                       | 10,0 – 14,0 (підвищена)                             |
| Основний механізм горіння у топці              | Поверхнєве вигорання коксового залишку      | Інтенсивне виділення та спалахування летких речовин |
| Схильність пилу до самозаймання та вибуху      | низька                                      | висока (вимагає контролю та інертизації)            |
| 3 Режими системи пилоприготування:             |   |   |
| Тип системи                                    | індивідуальна                               | індивідуальна                                       |
| Агент транспортування пилу                     | повітря                                     | повітря   |
| Максимальна температура за млином, °С          | 120 – 130                                   | не більше 70 – 80                                   |

Котли оснащені індивідуальною системою пилоприготування з повітряним транспортуванням пилу. Така схема є більш чутливою до вибухонебезпечних режимів порівняно з системами з газовим транспортуванням, що додатково ускладнює переведення агрегатів на паливо з високим виходом летких речовин.

Вугілля газової групи (на рис. 2) суттєво відрізняється від антрациту за основними показниками. Насамперед це стосується підвищеного виходу летких речовин, який може досягати 35 % – 45 % на горючу масу. Така особливість визначає інший механізм займання і горіння палива в топковому просторі. Якщо для антрациту характерним є пе-

реажно поверхнєве горіння коксового залишку, то для газового вугілля значна частина тепловиділення припадає на початкову стадію – виділення та згоряння летких компонентів.

Крім того, вугілля марок «Г» і «ДГ», що постачалося на станцію, характеризувалося нестабільними показниками зольності та вологості. У ряді випадків зольність досягала 30 % – 35 %, що призводило до зниження теплоти згоряння та погіршення умов підтримання номінального навантаження котла. Підвищена вологість палива ускладнювала процес сушіння в млинах та знижувала якість помелу.

Зміна фракційного складу та температури розм'якшення золи впливала на інтенсивність шлакоутворення та характер відкладень на поверхнях нагріву. Це вимагало додаткового аналізу умов теплообміну в топці та конвективних шахтах.

Методика дослідження базувалася на комплексному аналізі теплотехнічних, аеродинамічних та експлуатаційних параметрів роботи котла. Оцінка ефективності модернізації здійснювалася шляхом порівняння показників роботи агрегату до та після переведення на газове вугілля.

Першочергово аналізувався тепловий режим топки. Особлива увага приділялася розподілу температур по висоті топкового об'єму, характеру формування факела та інтенсивності теплового навантаження на екранні поверхні. Враховувалося, що при високому виході летких речовин зона максимального тепловиділення зміщується в нижню частину топки, що може спричинити локальні перегріву металу та прискорене шлакування пальникових амбразур.

Другим напрямом дослідження було вивчення режимів роботи системи пилоприготування. Критичним параметром стала температура пилоповітряної суміші за млином. Для газового вугілля необхідно забезпечувати знижену температуру сушильного агента з метою запобігання самозайманню пилу. Одночасно потрібно було зберегти достатню тонкість помелу для стабільного горіння в топці. Таким чином, методика передбачала пошук компромісу між безпекою та якістю підготовки палива.

Окремо досліджувалися аеродинамічні характеристики пилопроводів. Було виконано перерахунок швидкостей транспортування пилу з урахуванням змінених витрат повітря та температурних режимів.

Забезпечення достатньої швидкості потоку дозволяло виключити утворення застійних зон та накопичення пилу в горизонтальних ділянках трактів.

З метою визначення ефективності та надійності роботи котла ст. №1 ЦКТИ-87-39Ф2 Сумської ТЕЦ при їх переведенні з проектного палива «АШ» на непроектне вугілля марки «Г» був виконаний наступний комплекс розрахунків:

- розрахунки показників шлакування палив;
- теплогідравлічні розрахунки котла;
- розрахунки пилосистеми;
- аеродинамічні розрахунки дугтя;
- аеродинамічні розрахунки тяги;
- розрахунки пальників;
- очікувані концентрації шкідливих викидів від переоснащеного котла;
- розрахунок перетинів існуючих вибухових запобіжних клапанів на існуючій пилосистемі та бункері пилу;

– розрахунок теплової ізоляції вузлів, на яких проводиться капітальний ремонт.

Швидкості в пилопроводах прийняті на рівні 26–27 м/с на всіх навантаженнях котла для запобігання залягання пилу.

Для математичного обґрунтування прийнятих аеродинамічних рішень використовувалася формула нерозривності потоку, адаптована до умов транспортування пилу [4]:

$$w = \frac{V_{tr}(273 + t_{mix})}{3600 F 273}, \quad (1)$$

де  $w$  – швидкість пилоповітряної суміші в пилопроводі, м/с;

$V_{tr}$  – витрата транспортуючого повітря за нормальних умов, м<sup>3</sup>/год;

$t_{mix}$  – температура пилоповітряної суміші за млином, °С;

$F$  – сумарна площа поперечного перерізу пилопроводів, м<sup>2</sup>.

Згідно з виконаними розрахунками, для запобігання залягання пилу швидкості в пилопроводах прийняті на рівні 26–27 м/с на всіх навантаженнях котла. При цьому витрата транспортуючого повітря становить 19000–20000 м<sup>3</sup>/год, що перевищує мінімально допустимий поріг у 18500 м<sup>3</sup>/год, необхідний для забезпечення надійної роботи системи.

Витрата транспортуючого повітря на котел при заданій швидкості становить 19000–20000 м<sup>3</sup>/год. Витрата транспортуючого повітря на котел при всіх навантаженнях котла повинна становити не менше 18500 м<sup>3</sup>/год.

У зв'язку з переводом Сумської ТЕЦ на роботу котлів з вугілля АШ та Т на спалювання вугілля газової групи марки Г для забезпечення надійності роботи пальників і топки в цілому, була проведена заміна існуючих пальників для належної організації розподілу первинного та вторинного повітря, і швидкості.

Для спалювання вугілля газової групи використовуються прямоугоково-вихрові пальники, в яких первинне повітря подається в пальниках прямоютоком з підвищеними швидкостями 20 м/с, віддаючи початок спалювання від амбразури, захищаючи пальник від термічного руйнування.

Додатково регульована крутка вторинного повітря, яка забезпечує швидкість 26–28 м/с дозволить:

- оптимізувати горіння з мінімальним механічним недопалом;
- забезпечити довготривалу надійність пальників і тривалу ефективність роботи котла;
- впливати на довжину та розкриття факелу і тим саме запобігати накидання факелу на екранні труби та забезпечувати надійний вихід рідкого шлаку.

При розробці пальників враховані сучасні напрямки щодо конструювання пальників з ураху-

ванням економічних та екологічних показників роботи котлів, надійності та маневреності. По результатам розрахунку пального прийняті швидкості за первинним і вторинним повітрям відповідають сучасним рекомендаціям по проектуванню пальників, що забезпечить оптимальне вигорання палива при спалюванні широкого діапазону кам'яного вугілля.

З огляду на високий вміст летких речовин у газовому вугіллі, питання вибухобезпеки стало одним із ключових у процесі модернізації. Аналіз виконано з урахуванням фактичних концентрацій пилу в пилопроводах, температурного режиму та умов транспортування.

Для мінімізації ризику вибуху було обмежено температуру пилоповітряної суміші після млина, герметизовано пилові бункери та впроваджено систему інертизації. Також було змінено внутрішню геометрію окремих елементів сепараторів з метою стабілізації циркуляції пилу та запобігання його локальному перегріву.

Експлуатаційний контроль здійснювався шляхом постійного моніторингу температур, розрідження в топці, концентрації кисню та оксиду вуглецю у димових газах. Такий підхід дозволив своєчасно виявляти нестійкі режими та коригувати подачу повітря і палива.

В умовах роботи енергосистеми України важливою вимогою до теплоелектроцентралей є здатність до швидкої зміни навантаження. Переведення котлів на газове вугілля потенційно впливало на їхню маневреність через зміну кінетики горіння.

У процесі дослідження оцінювалися швидкість набору та скидання навантаження, стабільність параметрів пари, а також поведінка факела при перехідних режимах. Було встановлено, що за умови оптимізації подачі вторинного повітря та модернізації тягодуттєвого обладнання котли зберігають здатність працювати в регульованих режимах без втрати стійкості горіння.

Дослідження проводилися протягом трьох опалювальних сезонів в умовах реальної експлуатації. У ході дослідження було враховано пряму залежність між виходом летких речовин (показник *Vdaf*) та вибухонебезпечністю палива. Експериментально підтверджено, що при збільшенні вмісту летких речовин з 5 % (антрацит) до 35 % – 45 % (газове вугілля), критична температура самозаймання пилу знижується.

Це зумовило необхідність дотримання такої залежності для безпечної експлуатації:  $T_{\text{суміші}} < T_{\text{самозаймання}} - 25$  градусів.

Тобто, робоча температура пилоповітряної суміші після млина повинна бути на 25 градусів нижчою за температуру її можливого спалаху. Саме це обмеження дозволило стабілізувати роботу

модернізованих систем пилоприготування на Сумській ТЕЦ.

Такий підхід дозволив врахувати змінність якості палива, вплив зовнішніх температурних факторів та режимів навантаження.

Аналізувалися показники економічності, стабільності горіння, інтенсивності золоутворення, а також випадки аварійних ситуацій. Узагальнення отриманих даних підтвердило, що комплексна модернізація дозволила адаптувати котли до спалювання газового вугілля без зниження паспортної продуктивності та з дотриманням вимог безпеки.

Переведення котлів типу ЦКТИ-87/39 Ф2М на спалювання вугілля газової групи стало комплексним технічним завданням, яке потребувало одночасного перегляду теплотехнічних, аеродинамічних та конструктивних параметрів роботи агрегатів. На відміну від антрациту, для якого характерне порівняно повільне займання та переважно поверхневе горіння коксового залишку, газове вугілля формує інший механізм тепловиділення. Інтенсивне виділення та займання летких речовин призводить до зміщення активної зони горіння у нижню частину топкового простору, що суттєво впливає на розподіл теплових потоків і навантаження на екранні поверхні нагріву.

Перші етапи дослідної експлуатації показали, що без втручання у конструкцію пальникових пристроїв спостерігалось локальне підвищення температур у ядрі факела, що супроводжувалося інтенсифікацією шлакування амбразур пальників та зростанням теплового навантаження на нижні екрани. Це створювало потенційні ризики перегріву металу труб і зниження їх ресурсу. Аналіз температурних полів у топці засвідчив необхідність зміни організації процесу змішування пилоповітряної суміші з вторинним повітрям. У результаті було реалізовано реконструкцію пальників із коригуванням геометрії подачі вторинного повітря, що дозволило досягти більш поступового розгортання процесу горіння вздовж довжини факела.

Подовження факела та зниження пікових температур у його початковій зоні сприяли більш рівномірному розподілу теплового навантаження між радіаційними та конвективними поверхнями нагріву. У процесі експлуатаційного моніторингу було встановлено, що після модернізації спостерігається стабілізація температури перегрітої пари навіть при коливаннях якості палива. Це свідчить про покращення умов теплового сприйняття пароперегрівачем і зменшення амплітуди температурних відхилень у топковому просторі.

Окремим напрямом модернізації стало вдосконалення системи пилоприготування. Високий вихід летких речовин у поєднанні з повітряною схемою транспортування пилу значно підвищує вибухонебезпечність тракту. Практика показала, що навіть незначне перевищення температури пи-

лоповітряної суміші за млином може створити умови для самозаймання частинок пилу у бункерах або пилопроводах. З цією метою було жорстко регламентовано температурний режим сушіння та впроваджено додатковий контроль параметрів на виході з млинів.

Зниження температури сушильного агента, однак, призвело до підвищення залишкової вологості пилу. Це могло негативно вплинути на його текучість та рівномірність подачі до пальників. Для компенсації цього фактору було реконструйовано сепараційні елементи млинів, що дозволило змінити характер внутрішньої циркуляції матеріалу та забезпечити необхідну тонкість помелу без перегріву пилоповітряної суміші. У результаті вдалося досягти стабільного гранулометричного складу пилу, що позитивно позначилося на повноті згоряння та зменшенні механічного недопалу.

Важливим технічним рішенням стала заміна робочого колеса млинового вентилятора, що дозволило збільшити напір і компенсувати зростання гідравлічного опору модернізованих пилопроводів. Перерахунок діаметрів окремих ділянок тракту та оптимізація конфігурації поворотів сприяли усуненню застійних зон і зменшенню ризику накопичення пилу в горизонтальних відрізках. Практичні вимірювання швидкості транспортування підтвердили досягнення стабільних значень, достатніх для надійного переміщення пилоповітряної суміші без осадження частинок.

Під час експлуатації в умовах нестабільної якості палива особливо гостро проявилася проблема підвищеної зольності. Збільшення частки мінеральної складової призводило до зниження температури горіння та зменшення інтенсивності тепловиділення, що у свою чергу викликало тенденцію до «задихання» котла при спробах несення номінального навантаження. Для вирішення цього питання було модернізовано тягодуттєве обладнання, зокрема підвищено потужність димососа. Це дозволило збільшити коефіцієнт надлишку повітря в топці та забезпечити стабільне видалення продуктів згоряння навіть при форсованих режимах роботи.

Після впровадження зазначених заходів було зафіксовано суттєве покращення стійкості горіння. Факел набув більш передбачуваної структури, зменшилася концентрація оксиду вуглецю в димових газах, що свідчить про підвищення повноти згоряння. Одночасно зменшилися випадки локального перегріву поверхонь нагріву, а інтенсивність шлакування амбразур пальників знизилася до прийняттого рівня.

Не менш важливим аспектом стала модернізація заходів протипожежного захисту пилових бункерів. Герметизація з'єднань, встановлення додаткових датчиків температури та впровадження системи інертизації інертними газами дозволили

повністю виключити випадки самозаймання пилу під час пусків після короточасних зупинок. В умовах роботи енергосистеми з частими змінами навантаження це рішення мало принципове значення для забезпечення безпечної експлуатації.

У процесі тривалого моніторингу також було проаналізовано стан конвективних поверхонь нагріву. Виявилось, що зола газового вугілля має інший характер налипання та іншу температуру розм'якшення порівняно з антрацитом. Це потребувало коригування режимів обдування поверхонь нагріву та частоти включення сажобдувних апаратів. Після оптимізації цих режимів вдалося знизити інтенсивність попелових відкладень і стабілізувати теплопередачу в конвективній шахті.

Комплексність виконаних робіт дозволила не лише адаптувати котли до спалювання непроєктного палива, але й підвищити їх експлуатаційну гнучкість. Показники маневреності після модернізації відповідають вимогам роботи в умовах регулювання графіка навантаження енергосистеми. Швидкість зміни навантаження збереглася на рівні, достатньому для участі в покритті пікових режимів споживання.

Загалом результати впроваджених інженерних рішень свідчать про ефективність обраної стратегії модернізації. Незважаючи на суттєву відмінність фізико-хімічних властивостей газового вугілля від антрациту, вдалося забезпечити стабільну роботу котлів при збереженні паспортної паропродуктивності та дотриманні вимог безпеки.

Подальший аналіз ефективності модернізації було зосереджено на зміні економічних показників роботи котлоагрегатів. Перехід на газове вугілля об'єктивно супроводжується зниженням нижчої теплоти згоряння палива порівняно з антрацитом, що потенційно може призвести до зростання питомої витрати палива на виробництво одиниці теплової енергії. Однак практичні результати експлуатації показали, що за рахунок оптимізації процесу горіння, стабілізації гранулометричного складу пилу та підвищення повноти згоряння вдалося мінімізувати приріст питомої витрати. Фактичне збільшення витрати палива виявилось значно нижчим за прогнозоване на початковому етапі техніко-економічних розрахунків.

Важливу роль у збереженні економічності відіграла оптимізація коефіцієнта надлишку повітря. При спалюванні газового вугілля існує тенденція до збільшення подачі повітря з метою стабілізації факела, однак надмірне повітря призводить до підвищення втрат з відхідними газами. У процесі дослідної експлуатації було визначено раціональний діапазон режимів, за якого забезпечується повнота згоряння без істотного зростання температури та об'єму димових газів. Це дозволило зберегти прийнятний рівень теплових втрат і підтримати кое-

фіцієнт корисної дії котла на рівні, близькому до проектного.

Для визначення раціонального діапазону режимів було побудовано залежність втрат тепла від

коефіцієнта надлишку повітря. Графічне представлення цієї залежності наведено (рис. 3).

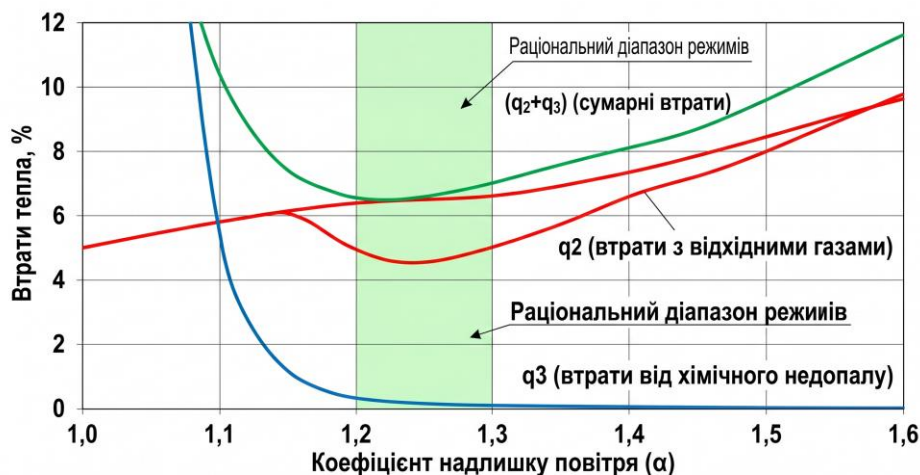


Рис. 3 – Визначення раціонального діапазону режимів роботи котла ЦКТИ-87/39 Ф2М за коефіцієнтом надлишку повітря

Окремо було проаналізовано зміну температури відхідних газів після конвективних поверхонь нагріву. Після впровадження заходів з оптимізації аеродинаміки газового тракту та коригування режимів сажобудування температура відхідних газів стабілізувалася, що свідчить про покращення умов теплообміну. Зниження інтенсивності попелових відкладень позитивно вплинуло на теплопередачу та зменшило необхідність частих технологічних зупинок для очищення поверхонь нагріву.

Вплив модернізації на ресурс металу поверхонь нагріву також став предметом окремого дослідження. Початкові побоювання стосувалися можливого прискореного зносу екранних труб унаслідок підвищених локальних температур у нижній частині топки. Проте після зміни геометрії палників та оптимізації розподілу вторинного повітря температурне поле стало більш рівномірним. Періодичні вимірювання товщини стінок труб і контроль стану металу не виявили прискорених темпів деградації. Таким чином, модернізація не лише не погіршила довговічність обладнання, але й сприяла зменшенню термічних перевантажень.

У контексті довгострокової експлуатації важливим показником стала стабільність роботи при змінній якості палива. Практика показала, що в умовах нестабільного постачання можливі значні коливання зольності та вологості вугілля навіть у межах однієї партії. Модернізована система управління режимами горіння дозволила оперативно реагувати на такі зміни шляхом коригування подачі повітря та навантаження млинів. Це суттєво підвищило адаптивність котла до реальних умов експлуатації.

Екологічні аспекти роботи після переведення на газове вугілля також були предметом аналізу. Зміна складу палива впливає на утворення оксидів азоту, оксиду вуглецю та твердих частинок. У процесі дослідження було встановлено, що при оптимізованих режимах горіння концентрація оксиду вуглецю в димових газах зменшилася завдяки більш повному вигорянню летких речовин. Щодо оксидів азоту, їх рівень залишився в межах допустимих значень, а в окремих режимах навіть спостерігалось незначне зниження внаслідок більш рівномірного температурного поля в топці.

Питання пиловиносу та ефективності роботи золовловлювального обладнання також набуло актуальності через зміну фракційного складу золи. Після адаптації режимів роботи електрофільтрів було забезпечено нормативний рівень очищення димових газів. Збільшення частки дрібнодисперсної золи вимагало більш ретельного контролю, однак істотного погіршення екологічних показників не відбулося.

Суттєвим фактором, що вплинув на результати модернізації, стали умови роботи в період воєнного стану. Часті зміни навантаження, аварійні відключення та обмеження у паливостачанні створювали додаткові навантаження на обладнання. У цих умовах модернізовані котли продемонстрували достатній рівень надійності. Системи інертизації та посиленого контролю температури пилу дозволили уникнути аварійних ситуацій навіть при повторних пусках після короткочасних зупинок.

Особливу увагу було приділено пусковим режимам, оскільки саме в цей період ризик нестабільного горіння та самозаймання пилу є найвищим.

Впровадження алгоритмів поступового прогріву та регламентованої послідовності включення млинів забезпечило передбачуваність процесу розпалу. Аналіз декількох десятків пусків показав відсутність критичних відхилень температурних параметрів і стабільне формування факела.

Узагальнюючи результати багатосезонної експлуатації, можна стверджувати, що комплексний підхід до модернізації виявився виправданим. Внесення змін лише в один елемент системи не дало б очікуваного ефекту. Лише одночасна оптимізація палинникових пристроїв, пилоприготування, тягодуттєвого обладнання та режимів очищення поверхонь нагріву забезпечила системний результат.

Таким чином, отримані результати підтверджують можливість ефективного використання вугілля газової групи в котлах, спроектованих для антрацити, за умов реалізації комплексу технічних та режимних заходів. Практичний досвід експлуатації доводить, що модернізація дозволяє зберегти виробничі показники агрегатів, забезпечити їхню безпечну роботу та підвищити адаптивність до нестабільних умов функціонування енергосистеми.

Додатковим напрямом оцінки ефективності модернізації стала перевірка довгострокової надійності обладнання в умовах циклічних навантажень. Робота теплоелектроцентралі в сучасних умовах характеризується підвищеною динамікою зміни режимів – частими переходами від мінімального до номінального навантаження, зупинками та повторними пусками. Такі умови експлуатації створюють підвищені термічні та механічні напруження в елементах котла, зокрема в барабані, колекторах, екранних трубах та пароперегрівачах. Після переведення на газове вугілля виникали побоювання щодо можливого посилення температурної нерівномірності в топці, що могло б призвести до збільшення термічної втоми металу.

Проте результати інструментального контролю та аналізу експлуатаційних журналів свідчать про стабілізацію температурних режимів після реалізації комплексу модернізаційних заходів. Більш рівномірне формування факела, зменшення локальних перегрівів у нижній частині топки та оптимізація подачі вторинного повітря забезпечили зниження амплітуди температурних коливань у характерних перерізах. Це позитивно вплинуло на напружено-деформований стан елементів конструкції та зменшило ризик утворення термічних тріщин.

Важливим аспектом стала також оцінка абразивного зносу поверхонь нагріву. Підвищена зольність газового вугілля потенційно може збільшувати інтенсивність ерозійного впливу частинок золи на трубні пучки конвективної шахти. Після оптимізації швидкості руху димових газів та кори-

гування схеми їхнього руху було досягнуто зниження локальних зон підвищеної турбулентності, що мінімізувало абразивний вплив. Планові огляди поверхонь нагріву не виявили прискореного зносу порівняно з періодом роботи на антрациті.

З точки зору техніко-економічної доцільності модернізація показала позитивні результати. Незважаючи на початкові капітальні витрати, пов'язані з реконструкцією палинників, заміною окремих елементів млинового та тягодуттєвого обладнання, а також впровадженням систем інертизації, забезпечено можливість використання більш доступного палива. Умови паливного ринку та логістичні обмеження суттєво підвищили цінність гнучкості у виборі палива. Таким чином, модернізація дозволила зменшити залежність від конкретної марки вугілля та підвищити енергетичну стійкість підприємства.

Аналіз режимів навантаження показав, що після завершення модернізації котли зберегли здатність стабільно працювати в широкому діапазоні потужностей. Особливо важливим стало забезпечення стійкого горіння при знижених навантаженнях, коли ризик погіршення процесу згорання є найбільш імовірним. Завдяки оптимізації пилоподачі та розподілу повітря вдалося уникнути нестійкості факела та зменшити кількість коригувальних втручань з боку оперативного персоналу.

Практичний досвід також засвідчив підвищення керованості процесу горіння. Після модернізації реакція котла на зміну подачі палива стала більш прогнозованою, а інерційність процесу зменшилася. Це спростило підтримання заданих параметрів пари та полегшило роботу персоналу в умовах швидкої зміни режимів.

В умовах нестабільного паливостачання суттєвою перевагою стало те, що модернізований котел продемонстрував здатність працювати на сумішах вугілля різної якості без суттєвого погіршення параметрів. Така універсальність є важливою характеристикою для сучасних теплоенергетичних підприємств, які змушені оперативно адаптуватися до змін ринку та логістики.

Окремої уваги заслуговує вплив модернізації на загальний рівень виробничої безпеки. Зниження ризику самозаймання пилу, підвищення контролю температурних режимів та покращення герметичності пилових трактів суттєво зменшили ймовірність аварійних ситуацій. Відсутність випадків вибухів або пожеж у пилоприготувальній системі протягом декількох сезонів експлуатації підтверджує правильність прийнятих технічних рішень.

Узагальнюючи результати проведеної роботи, слід відзначити, що модернізація котлів при переведенні на газове вугілля має розглядатися не як локальна реконструкція окремого вузла, а як системна трансформація теплотехнічного комплексу. Зміна характеристик палива впливає на всі елеме-

нти технологічного процесу – від млина до димососа – тому ефективність може бути досягнута лише за умови комплексного підходу.

Отримані результати підтверджують, що при правильному технічному супроводі та постійному моніторингу параметрів можливо забезпечити надійну та безпечну експлуатацію котлів, спроектованих для антрациту, на вугіллі газової групи без втрати паспортної продуктивності. Більше того, модернізація дозволила підвищити гнучкість роботи агрегатів, покращити керованість процесів та адаптивність до змін зовнішніх умов.

### Висновки

Таким чином, проведена модернізація може розглядатися як успішний приклад технічної адаптації енергетичного обладнання до нових паливних умов. Накопичений досвід має практичну цінність для інших теплоелектростанцій, що здійснюють або планують аналогічний перехід на неспроєктне паливо. Реалізовані технічні рішення демонструють можливість поєднання вимог економічності, безпеки та надійності навіть в умовах підвищеної невизначеності та нестабільності енергетичного сектору.

Проведена модернізація парових котлів типу ЦКТИ-87/39 Ф2М при переведенні на спалювання вугілля газової групи дозволила комплексно оцінити можливості адаптації енергетичного обладнання до нових паливних умов. У ході дослідження було підтверджено, що зміна фізико-хімічних властивостей палива впливає не лише на кінетику горіння та структуру факела, але й на розподіл теплових потоків, аеродинаміку пилових трактів, ефективність теплообміну та ресурсоемність металу поверхонь нагріву. Системний підхід, що поєднує технічні та режимні заходи, дозволив не лише забезпечити безпечну та стабільну роботу котлів, але й досягти високого рівня ефективності та маневреності агрегатів.

Наукова новизна проведеного дослідження полягає у визначенні комплексного впливу високого виходу летких речовин на процеси горіння, розподіл теплових потоків і формування факела у котлах, спроектованих під антрацит. Вперше були систематизовані технічні рішення, які дозволяють адаптувати пальникові пристрої, систему пилоприготування та тягодуттєве обладнання до палива з нестабільною якістю та високим ризиком самозаймання. У результаті вдалося розробити алгоритм регулювання процесу горіння, який забезпечує баланс між повнотою згорання, безпекою та економічною ефективністю.

Особливої уваги заслуговує інтеграція режимних та конструктивних заходів. Зміни геометрії подачі вторинного повітря та модернізація пальників дозволили подовжити факел та зменшити

локальні температурні пікування, що сприяє рівномірному прогріванню пароперегрівача і зниженню інтенсивності шлакування. Вдосконалення пилоприготування через реконструкцію сепараторів та вентиляційних систем забезпечило необхідну тонкість помелу при знижених температурах сушіння, одночасно мінімізуючи ризик вибуху пилоповітряної суміші. Модернізація тягодуттєвого обладнання і димососа підвищила стабільність видалення продуктів згорання, зберегла номінальну продуктивність котла і дозволила працювати в умовах змінної якості палива.

Практична цінність результатів полягає в тому, що модернізовані котли демонструють високу адаптивність до коливань якості вугілля, стабільність параметрів пари та керованість процесу горіння у широкому діапазоні навантажень. Це особливо важливо для роботи в умовах воєнного стану та частих змін графіків навантаження, коли можливість швидкої та безпечної зміни режимів є критичною для підтримки частоти та стабільності енергосистеми.

Результати дослідження також свідчать про значне зменшення технічних ризиків. Герметизація пилових бункерів, впровадження системи інертизації та контроль температури пилоповітряної суміші виключили випадки самозаймання, а оптимізація розподілу теплових потоків у топці забезпечила захист металу поверхонь нагріву від локальних перегрівів. Такий комплекс заходів суттєво підвищив рівень безпеки та надійності котлів при експлуатації на неспроєктному паливі.

Науково-практична значимість дослідження полягає також у можливості масштабування отриманих рішень на інші теплоелектростанції, що використовують котли аналогічного типу. Методика адаптації обладнання до газового вугілля, включаючи комплексну оцінку теплотехнічних, аеродинамічних та експлуатаційних параметрів, може бути використана як стандартизований підхід для модернізації енергетичних агрегатів у різних регіонах, де спостерігається нестабільність постачання палива.

У підсумку, дослідження доводить, що комплексна модернізація котлів, що враховує особливості нового палива, дозволяє досягти наступних результатів: забезпечити стабільну паропроductивність, підтримувати високий рівень керованості та маневреності, мінімізувати ризики аварійних ситуацій, підвищити ефективність горіння та зберегти ресурс обладнання. Всі ці фактори разом підкреслюють практичну та наукову цінність проведеної роботи, а також її потенціал для впровадження в масштабах енергетичного сектору країни.

Таким чином, дослідження демонструє, що модернізація котлів під неспроєктне паливо є ефективним і безпечним шляхом забезпечення стійкої

роботи теплоелектроцентралі, підвищення гнучкості енергетичного обладнання та зменшення залежності від обмежених ресурсів антрациту. Наукова новизна полягає у розробці системного підходу до адаптації технологічних комплексів під нові паливні умови з одночасним урахуванням теплотехнічних, аеродинамічних, економічних і екологічних факторів.

Реалізовані заходи дозволяють поєднати безпеку, ефективність, надійність та довговічність котлів, що забезпечує стабільну та прогнозовану роботу енергетичного обладнання в умовах сучасних викликів енергетичного сектору України.

#### Інформація щодо наборів даних

Нові великі набори даних у рамках цього дослідження не створювалися. Технічні розрахунки, режимні карти та експлуатаційні показники, використані в роботі, отримані безпосередньо з виробничо-технічного архіву ТОВ «Сумитеплоенерго» та кафедри парогенераторобудування НТУ «ХПІ» і доступні за обґрунтованим запитом до авторів.

#### Заява про внесок авторів

Васюнін Д. Г.: концептуалізація, методологія, збір та обробка експлуатаційних даних на базі Сумської ТЕЦ, написання – початковий варіант.

Сфімов О. В.: наукове керівництво, перевірка теплотехнічних та гідравлічних розрахунків, написання – рецензування та загальне редагування рукопису.

Каверцев В. Л.: виконання аеродинамічних розрахунків пилосистеми та пальників, формальний аналіз та графічне представлення результатів.

Усі автори ознайомилися з остаточною версією рукопису та погодилися з її публікацією.

#### Заява щодо фінансування та подяки

Це дослідження не отримувало зовнішнього цільового фінансування та виконане в рамках науково-виробничого співробітництва між ТОВ «Сумитеплоенерго» та Національним технічним університетом «Харківський політехнічний інститут».

Автори висловлюють подяку Навчально-науковій лабораторії комп'ютерних симуляцій та інтелектуальних обчислень (ННІ КСІО) кафедри математичного моделювання та інтелектуальних обчислень в інженерії Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» за надання доступу до обчислювальних ресурсів, використаних для проведення перевірочних розрахунків.

#### Заява щодо конфлікту інтересів

Автор Д. Г. Васюнін є директором ТОВ «Сумитеплоенерго», на базі якого проводилося дослідження. Інші автори (О. В. Сфімов, В. Л. Каверцев) є співробітниками НТУ «ХПІ» та не мають потенційного конфлікту інтересів. Дане дослідження спрямоване виключно на підвищення надійності роботи обладнання і не має комерційного характеру.

#### Заява щодо використання інструментів штучного інтелекту

У процесі підготовки та мовного редагування цієї роботи автори використовували інтелектуальні інструменти AI-асистентів виключно з метою технічного шліфування стилю, виправлення друкарських помилок та приведення тексту у відповідність до нормативних вимог академічних видань. Весь

змістовно-технічний та розрахунковий контент перевірено та затверджено авторами.

#### Список літератури

1. Перов М. О. Аналіз потреби ТЕС України в енергетичному вугіллі з урахуванням вимог до якості палива / М. О. Перов, В. М. Макаров, І. Ю. Новицький // Проблеми загальної енергетики. – 2016. – Вип. 3(46). – С. 40–49. – DOI: <https://doi.org/10.15407/pge2016.03.040>.
2. Kapustyanskiy A. Analysis of the fuel and energy complex of Ukraine / A. Kapustyanskiy, G. Varlamov // Scientific Journal of the Ternopil National Technical University. – 2016. – No. 3(83). – PP. 144–153. – URL: <https://visnyk.tntu.edu.ua/?art=327> (дата звернення 25.04.2026).
3. Dunayevska N. I., Bondzyk D. L., Nehamin M. M., Miroshnichenko Ye. S., Beztsennyi I. V., Yevtukhov V. Ya., Shudlo T. S. Technology of Anthracite and Solid Biofuels Co-Firing in Pulverized Coal Boilers of TPP and CHP / N. I. Dunayevska, D. L. Bondzyk, M. M. Nehamin, Ye. S. Miroshnichenko, I. V. Beztsennyi, V. Ya. Yevtukhov, T. S. Shudlo // Science and Innovation. – 2020. – Vol. 16, Is. 5. – PP. 79–89. – ISSN 2409-9066. – DOI: <https://doi.org/10.15407/scine16.05.079>.
4. Дунаєвська Н. І. Проблеми й технології термічної переробки палив в енергетичних установках теплових електростанцій / Н. І. Дунаєвська // Вісник Національної академії наук України. – 2023. – № 4. – С. 72–84. – DOI: <https://doi.org/10.15407/visn2023.04.072>.
5. Вишнянчин І. Л. Аналіз часткової заміни спалювання твердого палива на біопаливо на ТЕС України : бакалав. кваліф. робота / Вишнянчин Ігор Леонідович ; Заяць М. Ф. (наук. керівник). – Львів : Національний університет «Львівська політехніка», 2025. – URL: <https://ena.lpnu.ua/server/api/core/bitstreams/764f4ffa-b462-4450-afbc-03032d938d5e/content> (дата звернення 25.04.2026).
6. Чернявский Н. В. Разработка малозатратных технических решений для перевода антрацитовых котлов ТЭС и ТЭЦ паропроизводительностью 220–250 т/ч на сжигание газового угля / Н. В. Чернявский, А. В. Косячков, А. И. Росколуца // Збірник наукових праць XIII Міжнародна науково-практична конференція «Вугільна теплоенергетика: Шляхи реконструкції та розвитку», 26–28 вересня 2017 р., Київ, Україна. – 2017. – С. 48–50. – ISBN 978-966-2760-67-5. – URL: <http://www.ceti-nasu.org.ua/upload/iblock/8a2/8a29ea5c807579c50f0b4755740a37cf.pdf> (дата звернення 25.04.2026).
7. Кобзар С. Г. Дослідження процесу сумісного спалювання природного газу з RDF в модельній камері згоряння / С. Г. Кобзар, О. І. Топал, Л. С. Гапонич, І. Л. Голенко // Bulletin of National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”. Series “Chemical Engineering, Ecology and Resource Saving”. – 2021. – № 4(20). – С. 67–73. – DOI: <https://doi.org/10.20535/2617-9741.4.2021.248946>.
8. Кобзар С. Г. Визначення ефективності зниження викидів оксидів азоту системою ступеневого спалювання вугілля котла ТПП-312 блоку № 6 ДТЕК Ладизинська ТЕС / С. Г. Кобзар, А. А. Халатов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – 2014. – № 13(1056). – С. 85–91. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2078-774X (print). – ISSN 2707-7543 (on-line).
9. Грязев Д. С. Реконструкція котла ТП-100 при його переводі з АШ на газове вугілля : магст. робота : 142 Енергетичне машинобудування ; захищена 21.05.2018 / Грязев Дмитро Станіславович. – Київ, 2018. – 82 с. – URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/12efd0f2-68e9-4f68-b600-4b4b984ccd6d/content> (дата звернення 25.04.2026).
10. Zubtsov Y., Glikina I. Development of a new method for stone coal converting into a liquid high-temperature heat carrier based on energy factors / Y. Zubtsov, I. Glikina // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2024. – Vol. 6,

Is. 6(132). – PP. 59–69. – DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.318568>.

11. Гламаздин П. М. Энергоэффективная модернизация котлѳв КВГ та ТВГ / П. М. Гламаздин, Д. П. Гламаздин // Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання. – 2021. – № 36. – С. 22–35. – DOI: <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2021.36.22-35>.

#### References (transliterated)

- Perov M. O., Makarov V. M., I. Yu. Novytskyi (2016), “Analysis of the Demand of Ukrainian Thermal Power Plants for Steam Coal with Regard for Requirements to Fuel Quality”, *System Research in Energy*, no. 3(46), pp. 40–49, <https://doi.org/10.15407/pge2016.03.040>.
- Kapustyanskyi A., Varlamov G. (2016), “Analysis of the fuel and energy complex of Ukraine”, *Scientific Journal of the Ternopil National Technical University*, no. 3(83), pp. 144–153, Access mode: <https://visnyk.tntu.edu.ua/?art=327> (accessed 25 April 2026).
- Dunayevska N. I., Bondzyk D. L., Nehamin M. M., Miroshnichenko Ye. S., Beztsennyi I. V., Yevtukhov V. Ya., Shudlo T. S. (2020), “Technology of Anthracite and Solid Biofuels Co-Firing in Pulverized Coal Boilers of TPP and CHP”, *Science and Innovation*, vol. 16, is. 5, pp. 79–89, ISSN 2409-9066, <https://doi.org/10.15407/scine16.05.079>.
- Dunayevska N. I. (2023), “Problems and Technologies of Thermal Processing of Fuels in Energy Installations of Thermal Power Plants”, *Visnyk of the National Academy of Sciences of Ukraine*, no. 4, pp. 72–84, <https://doi.org/10.15407/vsn2023.04.072>.
- Vyshniachyn I. L., Zayats M. F. (leader) (2025), “Analysis of partial replacement of solid fuel combustion with biofuels at Ukrainian thermal power plants”, *Bachelor qualification work*, Polytechnic National University, Lviv, Ukraine.
- Chernyavsky N. V., Kosyachkov A. V., Roskolupa A. I. (2017), “Razrabotka malozatratnyh tehnicheskikh reshenij dlja perevoda antracitovyh kotlov TJeS i TJeC paroproizvoditel'nost'ju 220–250 t/ch na szhiganie gazovogo uglja [Development of Low-Cost Technical Solutions for Conversion of Anthracite Boilers of TPPs and CHPPs with Steam Capacity of 220–250 t/h to Gas Coal Combustion]”, *13<sup>th</sup> International scientific-practical conference “Coal thermal energy: ways of reconstruction and development”*: Collection of Science works, 26–28 September 2017., Kiev, Ukraine, pp. 48–50, ISBN 978-966-2760-67-5, Access mode: <http://www.cetinasu.org.ua/upload/iblock/8a2/8a29ea5c807579c50f0b4755740a37cf.pdf> (accessed 25 April 2026).
- Kobzar S., Topal O., Haponych L., Golenko I. (2021), “Research of Co-Combustion Process of Natural Gas and RDF in Model Combustion Chamber”, *Bulletin of National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”*. Series “Chemical Engineering, Ecology and Resource Saving”, no. 4(20), pp. 67–73, <https://doi.org/10.20535/2617-9741.4.2021.248946>.
- Kobzar S. G., Khalatov A. A. (2014), “Vyznachennja efektyvnosti znyzhennja vykydiv oksydiv azotu systemoju stupen-evogo spaljuvannja vugillja kotla TPP-312 bloku № 6 DTEK Ladyzhyns'ka TES [Determining the Efficiency of the Reduction of Nitrogen Oxide Emissions Using the System of Phasic Coal Combustion of the TPP-312 Boiler, Block No 6 DTEK of Ladyzhynskaia Thermal Power Station]”, *Bulletin of NTU “KhPI”*. Series: Power and heat engineering processes and equipment, no. 13(1056), pp. 85–91, ISSN 2078-774X (print), ISSN 2707-7543 (on-line).
- Gryazev D. S. (2018), Rekonstrukcija kotla TP-100 pry jogo perevodi z ASH na gazove vugillja [Reconstruction of TP-100 Boiler when Converting from Anthracite Sludge to Gas Coal], NTUU “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, 82 p., Access mode: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/12efd0f2-68e9-4f68-b600-4b4b984ccd6d/content> (accessed 25 April 2026).
- Zubstov Y., Glikina I. (2024), “Development of a new method for stone coal converting into a liquid high-temperature heat carrier based on energy factors”, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 6, is. 6(132), pp. 59–69, <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.318568>.
- Glamazdin P., D. Glamazdin (2021), “Energy efficient modernization of KVG and TGV boilers”, *Ventilation, Illumination and Heat-Gas Supply*, no. 36, pp. 22–35, <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2021.36.22-35>.

Надійшла (received) 26.04.2026

Прийнята (accepted) 16.05.2026

Публікація (published) 29.05.2026

#### Відомості про авторів / About the Authors

**Васюнін Дмитро Геннадійович (Vasiunin Dmytro)** – аспірант кафедри парогенераторобудування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; директор Товариства з обмеженою відповідальністю «Сумитеплоенерго», Суми, Україна; e-mail: [dmytrovasunin@ukr.net](mailto:dmytrovasunin@ukr.net); ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-1799-4002>.

**Єфімов Олександр Вячеславович (Yefimov Oleksandr)** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри парогенераторобудування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; e-mail: [AVEfimov22@gmail.com](mailto:AVEfimov22@gmail.com), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3300-7447>.

**Каверцев Валерій Леонідович (Kavertsev Valerii)** – кандидат технічних наук, доцент кафедри парогенераторобудування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; e-mail: [kavarseff@gmail.com](mailto:kavarseff@gmail.com), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9472-1658>.