

ВІДГУК

офіційного опонента, доктора технічних наук, доцента

Третяка Олексія Володимировича

на дисертаційну роботу

Мазура Андрія Олександровича

**«ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАХОДІВ З РАЦІОНАЛЬНОЇ
МОДЕРНІЗАЦІЇ ТЕПЛОВИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ
ЕКОЛОГО-ТЕРМОЕКОНОМІЧНОГО АНАЛІЗУ»,**

подану на здобуття ступеня доктора філософії

за спеціальністю **144 – «Теплоенергетика»**

Актуальність теми дисертаційної роботи

Сучасний розвиток теплоенергетики характеризується необхідністю одночасного забезпечення високої енергетичної ефективності, екологічної безпеки та економічної доцільності експлуатації енергетичного обладнання. Особливої актуальності ці питання набувають для України, де переважна більшість теплових електростанцій і теплоелектроцентралей експлуатується протягом тривалого часу, а значна частина основного енергетичного обладнання наближається або вже перевищила нормативний строк служби. За таких умов повна заміна обладнання є економічно не доцільною, тому одним із найперспективніших напрямів розвитку галузі стає наукове обґрунтування модернізації діючих енергетичних об'єктів.

Додатковими чинниками, що визначають актуальність дослідження, є посилення екологічних вимог до енергетичного сектору, необхідність скорочення питомих витрат палива та викидів парникових газів, а також інтеграція України до європейської енергетичної енергосистеми. У цих умовах особливого значення набуває застосування сучасних методів прикладної термодинаміки, які дозволяють оцінювати ефективність роботи енергетичних систем не лише за енергетичними, а й за ексергетичними, економічними та екологічними показниками.

Незважаючи на значну кількість наукових праць, присвячених модернізації теплових електростанцій, більшість існуючих досліджень спрямована на підвищення окремих техніко-економічних показників або оптимізацію окремих елементів теплових схем. Водночас питання комплексного вибору варіантів модернізації з урахуванням взаємозв'язку між енергетичною ефективністю, ексергетичними втратами, екологічними показниками, економічними витратами та конструктивними особливостями існуючих електростанцій залишаються

недостатньо дослідженими. Саме тому розроблення комплексних методів еколого-термoeкономічного аналізу та структурно-варіантної оптимізації модернізації ТЕС і ТЕЦ є важливим науковим завданням, що має істотне практичне значення.

Важливою особливістю представленої дисертаційної роботи є її орієнтація не лише на розроблення нових схем енергетичних установок, а й на створення методології вибору найбільш раціональних напрямів модернізації з урахуванням реальних умов експлуатації діючих електростанцій. Здобувачем запропоновано комплексний підхід, який поєднує можливості ексергетичного аналізу, термoeкономічної оптимізації, оцінювання екологічних факторів та врахування структурної складності модернізації, що істотно розширює можливості прийняття інженерних рішень під час модернізації енергетичного обладнання.

Безумовною перевагою роботи є те, що запропоновані методичні підходи не обмежуються аналізом окремих технічних рішень, а формують універсальний інструментарій для порівняння альтернативних варіантів модернізації теплових схем енергетичних установок різного призначення. Запропонований критерій структурної складності модернізації дозволяє вперше враховувати рівень конструктивних змін, необхідних для реалізації конкретного технічного рішення, що має важливе значення при реконструкції діючих електростанцій в умовах обмежених фінансових ресурсів.

Актуальність виконаного дослідження підтверджується також його відповідністю сучасним напрямам розвитку світової теплоенергетики, орієнтованим на декарбонізацію, підвищення ефективності використання паливно-енергетичних ресурсів, скорочення викидів парникових газів та впровадження методів багатокритеріальної оптимізації енергетичних систем. Результати дисертаційної роботи безпосередньо пов'язані з виконанням науково-дослідних робіт Інституту енергетичних машин і систем ім. А. М. Підгорного НАН України, що свідчить про їх практичну спрямованість та відповідність пріоритетним напрямам розвитку науки і техніки України.

Таким чином, дисертаційна робота Мазура А.О., яка присвячена теоретичному обґрунтуванню заходів раціональної модернізації теплових електростанцій із застосуванням еколого-термoeкономічного аналізу, є своєчасною, актуальною та спрямованою на вирішення важливої науково-практичної проблеми підвищення ефективності функціонування теплоенергетичних об'єктів, що має істотне значення для розвитку сучасної теплоенергетики України.

Ступінь обґрунтованості та достовірності наукових положень, висновків і рекомендацій

Ознайомлення зі змістом дисертаційної роботи Мазура А.О. свідчить, що поставлена наукова проблема вирішувалася системно та послідовно. Робота характеризується чіткою логічною структурою, у якій кожний наступний розділ є логічним продовженням попереднього та спрямований на досягнення поставленої мети. Мета дисертаційної роботи, сформульовані задачі, об'єкт і предмет дослідження взаємопов'язані та повністю відповідають темі дослідження.

Наукові положення, сформульовані автором, ґрунтуються на сучасних положеннях прикладної термодинаміки, ексергетичного аналізу, термoeкономіки, математичного моделювання та системного аналізу складних енергетичних об'єктів. Для розв'язання поставлених задач використано комплекс взаємодоповнюючих методів дослідження, що забезпечує належний рівень достовірності одержаних результатів.

Обґрунтованість отриманих результатів забезпечується насамперед широким аналізом сучасного стану розвитку теплоенергетики та існуючих методів модернізації теплових електростанцій. Автором проведено критичний аналіз сучасних напрямів підвищення ефективності ТЕС і ТЕЦ, досліджено існуючі схеми комбінованих парогазових установок, а також проведено узагальнення сучасних методів енергетичного, ексергетичного, екологічного та термoeкономічного аналізу, що дозволило визначити невирішені наукові задачі та сформувати власний напрям досліджень.

Рівень достовірності результатів підтверджується використанням фізично обґрунтованих математичних моделей теплових схем енергетичних установок. При проведенні досліджень автор не обмежився лише оцінкою енергетичних характеристик, а застосував ексергетичний підхід, який дозволяє встановити справжні причини втрат ефективності та визначити найбільш доцільні напрями вдосконалення теплових схем. Це свідчить про достатньо глибоке володіння сучасними методами аналізу енергетичних систем.

Важливою перевагою роботи є те, що запропоновані методи дослідження не мають вузької прикладної спрямованості. Розроблений автором підхід до структурно-варіантної оптимізації може застосовуватися для широкого класу теплових електростанцій різної потужності та конфігурації, що значно підвищує практичну цінність отриманих результатів.

Достовірність наукових положень підтверджується також тим, що розрахункові результати отримано для реальних теплофікаційних паротурбінних установок, які експлуатуються на ТЕЦ. Використання фактичних технічних параметрів обладнання забезпечує прикладний характер досліджень і дозволяє оцінити можливість практичного використання запропонованих рекомендацій. Практична цінність роботи підтверджена їх апробацією на діючій теплоелектроцентралі.

У дисертації запропоновано методологію вибору варіантів модернізації, яка одночасно враховує енергетичні, ексергетичні, економічні, екологічні та конструктивні фактори. Такий підхід є науково обґрунтованим і відповідає сучасним тенденціям розвитку світової теплоенергетики.

Також, про достовірність результатів свідчить достатня апробація роботи. Основні положення дисертації доповідалися на міжнародних наукових конференціях, а результати досліджень опубліковано у фахових виданнях України та фахових наукових журналах, що індексуються у наукометричних базах даних, зокрема Scopus.

У цілому слід констатувати, що наукові положення, висновки та рекомендації, сформульовані у дисертаційній роботі, є достатньо аргументованими, логічно взаємопов'язаними, теоретично обґрунтованими та підтвердженими результатами чисельних досліджень. Поставлені автором задачі повністю вирішені, а зроблені висновки відповідають отриманим результатам і впливають зі змісту проведених досліджень.

Оцінка наукової новизни дисертаційної роботи

Дисертаційна робота Мазура А.О. містить низку нових наукових результатів, що мають істотне значення для розвитку методів модернізації теплових електростанцій на основі сучасних підходів прикладної термодинаміки та термoeкономічного аналізу.

Найважливішим науковим результатом дисертації є *розроблення нового методичного підходу до вибору раціонального варіанта модернізації теплових електростанцій*, який, на відміну від існуючих методів, враховує не лише енергетичну ефективність, а й **структурну складність модернізації** енергетичного обладнання. Запропонований критерій структурної складності модернізації дозволяє кількісно оцінити обсяг конструктивних змін, необхідних для реалізації

певного варіанта модернізації, що є новим підходом при прийнятті інженерних рішень.

До безумовних наукових здобутків автора слід віднести ***розроблений метод термoeкономічної структурно-варіантної оптимізації теплових схем***, у якому вперше введено екологічні показники як додаткові економічні витрати разом з ексергетичною ефективністю, капітальною вартістю обладнання та строку експлуатації обладнання. На відміну від існуючих, запропонований підхід дозволяє виконувати багатокритеріальне порівняння альтернативних варіантів модернізації.

Важливим науковим результатом є ***подальший розвиток методів ексергетичного аналізу*** шляхом введення нового критерію – ***відносної різниці ексергетичної вартості Δk*** , який запропоновано використовувати для порівняння різних варіантів модернізації теплових схем. Використання цього показника суттєво розширює можливості аналізу ефективності енергетичних систем та дозволяє більш обґрунтовано оцінювати результати модернізації.

Наукову цінність мають також результати комплексного дослідження модернізованих теплофікаційних паротурбінних установок, які дали змогу встановити закономірності впливу зміни структури теплової схеми на ексергетичні втрати окремих елементів, розподіл ексергетичної вартості в енергетичній системі та загальну ефективність роботи установки.

Окремо слід відзначити, що автор не обмежився розробленням окремих методик, а сформував цілісну концепцію комплексної еколого-термoeкономічної оцінки модернізації теплових електростанцій, яка поєднує сучасні методи прикладної термодинаміки, економічного аналізу та оцінювання екологічних факторів. Саме комплексність запропонованого підходу визначає наукову новизну роботи та її відмінність від більшості відомих досліджень у цій галузі.

У цілому наведені у дисертаційній роботі наукові результати характеризуються належним рівнем наукової новизни та обґрунтованості, мають теоретичне значення та можуть бути використані як основа для подальшого розвитку методів проектування і модернізації теплових електростанцій.

Теоретичне та практичне значення отриманих результатів

Отримані в дисертаційній роботі наукові результати мають істотне теоретичне та практичне значення для розвитку сучасної теплоенергетики, оскільки спрямовані на вдосконалення науково-методичних підходів до модернізації

теплових електростанцій і теплоелектроцентралей з урахуванням сучасних вимог щодо енергетичної ефективності, екологічної безпеки та економічної доцільності.

Теоретична цінність дисертації полягає у подальшому розвитку методів ексергетичного та термoeкономічного аналізу енергетичних установок. Автором сформовано комплексний підхід до оцінювання ефективності модернізації теплових схем, який інтегрує класичні методи аналізу із новими критеріями вибору технічних рішень. Запропоновані методичні положення розширюють можливості застосування ексергетичного аналізу не лише для визначення джерел втрат енергії, а й для прийняття оптимальних інженерних рішень щодо модернізації діючих теплоенергетичних об'єктів.

Особливу увагу заслуговує розроблений критерій структурної складності модернізації, який дозволяє кількісно оцінювати змінення конструкції теплової схеми та враховувати їх при виборі найбільш раціонального варіанта модернізації. Запропонований підхід має самостійне наукове значення та може бути використаний у подальших дослідженнях, присвячених оптимізації складних енергетичних систем.

Важливою перевагою дисертаційної роботи є її прикладна спрямованість. Практичне значення роботи полягає у можливості використання розроблених методів при проектуванні нових та модернізації існуючих теплових електростанцій і теплоелектроцентралей. Запропоновані методичні підходи апробовано на прикладі реальної теплофікаційної паротурбінної установки, що підтверджує можливість їх практичного використання в умовах діючих підприємств теплоенергетики. Отримані результати можуть бути використані при розробленні програм технічного переоснащення ТЕС і ТЕЦ, підвищенні ефективності використання паливно-енергетичних ресурсів та скороченні негативного впливу енергетики на навколишнє середовище.

Запропоновані рекомендації можуть бути використані проєктними, науково-дослідними та експлуатаційними організаціями під час розроблення технічних рішень щодо модернізації енергетичного обладнання.

Крім безпосереднього практичного застосування, результати дисертаційної роботи можуть бути використані в освітньому процесі під час підготовки здобувачів вищої освіти за спеціальністю 144 «Теплоенергетика», а також при виконанні науково-дослідних робіт, пов'язаних із підвищенням ефективності функціонування енергетичних систем.

Отже, запропоновані автором методичні рішення становлять інтерес як для наукових досліджень, так і для практики модернізації сучасних теплоенергетичних об'єктів.

Аналіз змісту дисертаційної роботи

Дисертаційна робота викладена логічно, має чітку структуру та складається зі вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел і додатків. Побудова роботи є послідовною: від аналізу сучасного стану проблеми до розроблення нових методичних підходів та їх практичної апробації. Усі розділи взаємопов'язані між собою, а отримані результати послідовно використовуються для вирішення поставлених завдань.

Аналіз першого розділу

У першому розділі автором проведено детальний аналіз сучасного стану розвитку теплоенергетики та основних напрямів підвищення ефективності теплових електростанцій. Значну увагу приділено сучасним технологіям модернізації ТЕС, комбінованим парогазовим установкам, застосуванню абсорбційних теплових насосів, використанню вторинних енергетичних ресурсів, а також методам оцінювання ефективності енергетичних систем.

Позитивною рисою розділу є критичний аналіз великої кількості сучасних наукових публікацій. Автор визначає існуючі недоліки сучасних підходів, формулює проблемні питання та обґрунтовує необхідність розроблення нових методів комплексної оцінки варіантів модернізації.

Особливу увагу приділено аналізу сучасних методів ексергетичного та термoeкономічного аналізу. Автор показує переваги використання ексергетичних критеріїв порівняно з традиційними енергетичними показниками та обґрунтовує доцільність комплексного застосування енергетичних, економічних та екологічних критеріїв під час модернізації теплоенергетичних установок.

За результатами проведеного аналізу сформульовано наукову проблему, визначено мету дослідження та основні завдання дисертаційної роботи, сформовані на основі критичного огляду наукової літератури.

Аналіз другого розділу

Другий розділ присвячено розробленню методів пошуку раціональних рішень модернізації існуючих ТЕЦ на основі порівняння схем за критерієм структурної складності модернізації на прикладі комбінованих парогазових установок із

використанням газотурбінної установки ГТЕ-60, котла-утилізатора та паротурбінної установки Т-100/120-130.

Автором запропоновано методику комплексного оцінювання ефективності теплових схем. Значну увагу приділено формуванню критеріїв, які дозволяють враховувати вплив змінення складу обладнання енергетичної установки при виборі раціонального варіанту.

Суттєвим науковим результатом другого розділу є розроблення методичного підходу, який у подальшому використовується при аналізі різних варіантів модернізації теплових схем.

Аналіз третього розділу

Третій розділ дисертаційної роботи присвячено практичному застосуванню розроблених методичних підходів для дослідження варіантів модернізації теплових електростанцій. Розглянуто особливості застосування ексергетичного аналізу до реальних теплофікаційних паротурбінних установок, виконано порівняння різних технічних рішень та визначено фактори, що найбільше впливають на зміну ефективності функціонування енергетичних систем.

Важливою особливістю наведеного у розділі дослідження є те, що автор не обмежується визначенням інтегральних показників ефективності, а здійснює детальний аналіз окремих елементів теплової схеми. Це дозволяє встановити розподіл ексергетичних втрат між компонентами установки, визначити найбільш проблемні вузли та оцінити доцільність їх модернізації.

Науковий інтерес становить запропонований підхід до оцінювання ексергетичної вартості енергетичних потоків, який дозволяє визначити реальну ефективність окремих технічних рішень завдяки впровадженню нового критерію, який представляє собою відносну різницю ексергетичної вартості кожного елементу схеми.

Виконані розрахунки демонструють належний рівень володіння автором сучасними методами прикладної термодинаміки, а отримані результати мають достатнє фізичне обґрунтування і добре узгоджуються з сучасними науковими уявленнями про процеси перетворення енергії в теплоенергетичних установках.

Аналіз четвертого розділу

Четвертий розділ присвячено дослідженню конкретних напрямів модернізації теплоелектроцентралей із застосуванням запропонованих методичних підходів.

Перевагою дослідження є те, що аналіз не обмежується лише визначенням приросту коефіцієнта корисної дії, а охоплює також оцінювання зміни

ексергетичних втрат та ексергетичної вартості модернізованої установки. Такий підхід дозволяє всебічно оцінити доцільність впровадження запропонованих технічних рішень.

В розділі розглянуто різні комбіновані схеми, зокрема розглянуто інтеграцію газотурбінної установки у теплову схему ТЕЦ є ефективним напрямом модернізації, який забезпечує підвищення електричного ККД та збільшення виробітку електроенергії. Визначено вплив ступеня бінарності (γ) на ефективність парогазової установки.

Окремо слід виділити запропоноване схемне рішення з додатковою турбіною у відборі пари з частини низького тиску для зменшення втрат ексергії в мережних підігрівачах.

Результати досліджень мають безпосереднє практичне значення, оскільки можуть бути використані під час модернізації існуючих теплоелектроцентралей України.

Аналіз п'ятого розділу

П'ятий розділ присвячено розробленню методів вибору найбільш раціонального варіанта модернізації теплових електростанцій. Автором запропоновано метод структурно-варіантної оптимізації модернізації, який дозволяє виконувати комплексне порівняння альтернативних технічних рішень за сукупністю енергетичних, економічних, екологічних та конструктивних критеріїв.

Вагомим науковим результатом дисертаційної роботи є запропонований критерій структурної складності модернізації, який характеризується достатнім рівнем оригінальності. Його використання дозволяє кількісно оцінити рівень конструктивного втручання у теплову схему та враховувати цей фактор під час вибору оптимального варіанта модернізації. Запропонований критерій може бути корисним не лише для теплоенергетики, а й для інших галузей енергетичного машинобудування.

Практична цінність результатів п'ятого розділу полягає у можливості використання розробленої методики під час планування модернізації діючих теплових електростанцій, коли необхідно враховувати не лише економічний ефект, а й складність реалізації проекту, обсяг необхідної модернізації обладнання та строки її виконання.

У цілому результати п'ятого розділу є логічним підсумком проведених досліджень і підтверджують досягнення поставленої мети дисертаційної роботи.

Повнота викладення наукових результатів у публікаціях

Основні результати дисертаційної роботи достатньою мірою висвітлено у наукових публікаціях автора. За темою дисертації опубліковано наукові статті у фахових виданнях України, а також у міжнародних наукових журналах, що індексуються в наукометричних базах даних, зокрема Scopus. Крім того, результати досліджень апробовано на міжнародних та всеукраїнських наукових конференціях.

Аналіз змісту публікацій свідчить, що вони достатньо повно відображають основні положення дисертації, її наукову новизну та практичне значення. Опубліковані роботи охоплюють усі ключові етапи проведених досліджень: від розроблення методичних основ еколого-термoeкономічного аналізу до дослідження конкретних варіантів модернізації теплоенергетичних установок.

Кількість і рівень наукових праць відповідають вимогам, встановленим для здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 144 «Теплоенергетика». Опубліковані результати забезпечують достатню апробацію дисертаційної роботи та підтверджують її наукову цінність.

Зауваження до дисертаційної роботи

Позитивно оцінюючи дисертаційну роботу в цілому, слід зазначити окремі положення, які мають дискусійний характер або потребують додаткового пояснення.

1. У дисертаційній роботі при оцінюванні ефективності теплових схем використано показник ексергетичної вартості. Водночас доцільно було б більш детально розкрити фізичний зміст цього показника та окремо пояснити взаємозв'язок між зменшенням деструкції ексергії окремих елементів системи і зміною ексергетичної вартості кінцевого продукту.

2. У роботі наведено діаграми Грасмана (стор. 92), які відображають розподіл ексергетичних потоків між окремими елементами теплової схеми. Разом із тим доцільно було б більш детально сформулювати практичні висновки, отримані на основі аналізу цих діаграм, зокрема щодо визначення пріоритетності модернізації окремих елементів обладнання, а також показати їх зв'язок із вибором запропонованих у роботі технічних рішень.

3. Під час аналізу ефективності запропонованих варіантів модернізації в роботі основну увагу приділено стаціонарним режимам роботи обладнання. Водночас доцільно було б окремо розглянути вплив перехідних режимів

експлуатації на отримані показники ефективності, особливо з огляду на роботу сучасних електростанцій в умовах змінного графіка навантаження.

4. Відповідно до Рис. 4.2 енергетичний котел має найбільшу ексергетичну вартість серед усіх елементів модернізованої теплової схеми. Разом із тим доцільно було б більш детально пояснити, чи пов'язано це насамперед із високою ексергетичною деструкцією в котлі, чи з тим, що саме через нього проходить первинний паливний потік і формується ексергетична вартість усіх наступних продуктів системи.

Наведені зауваження мають переважно рекомендаційний характер, не знижують наукової цінності виконаної роботи та не впливають на загальну позитивну оцінку дисертації.

Відсутність порушень академічної доброчесності

Аналіз змісту дисертаційної роботи, її структури, використаних літературних джерел, наведених результатів досліджень та списку наукових праць автора дає підстави зробити висновок, що дисертація є самостійно виконаною завершеною науковою працею.

Використані в роботі положення інших авторів супроводжуються належними бібліографічними посиланнями. Наукові результати, що виносяться на захист, сформульовані автором самостійно, а їх апробація та публікація відповідають чинним вимогам до дисертаційних досліджень. Ознак порушення принципів академічної доброчесності, зокрема академічного плагіату, фабрикації чи фальсифікації результатів дослідження, під час ознайомлення з дисертаційною роботою не виявлено.

Загальний висновок

Дисертаційна робота здобувача є завершеним самостійним науковим дослідженням, у якому вирішено актуальне науково-прикладне завдання, що полягає у розвитку методів комплексного оцінювання та вибору раціональних напрямів модернізації теплових електростанцій із використанням сучасних підходів ексергетичного, термoeкономічного та екологічного аналізу.

Отримані автором наукові результати є новими, достатньо обґрунтованими, мають теоретичне та практичне значення для розвитку теплоенергетики, а сформульовані висновки повністю відповідають поставленій меті та завданням дослідження.

За актуальністю тематики, науковою новизною, рівнем теоретичного опрацювання, практичною значущістю отриманих результатів та якістю їх апробації дисертаційна робота **«Теоретичне обґрунтування заходів з раціональної модернізації теплових електростанцій із застосуванням еколого-термoeкономiчного аналізу»** відповідає вимогам до дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора філософії, а саме вимогам пунктів 6, 7, 8 і 9 Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії, затвердженого Постановою КМУ від 12.01.2022 р. №44.

Вважаю, що Мазур Андрій Олександрович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії за спеціальністю 144 «Теплоенергетика».

Офіційний опонент:

завідувач кафедри аерогідродинаміки

Національного аерокосмічного університету

«Харківський авіаційний інститут»

доктор технічних наук, доцент

Олексій ТРЕТЯК

«___» _____ 2026 р.