

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу Тертишного Ігоря Миколайовича «Удосконалення конструкції блоково-комплектних турбокомпресорних агрегатів з газотурбінним приводом для компресорних станцій магістральних газопроводів», подану на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.16 – Турбомашини і турбоустановки

1. Актуальність теми дисертаційної роботи

Актуальність даної роботи полягає у тому, що більшість складових елементів газотранспортної системи України морально та фізично зношена й потребує впровадження сучасних технологій та підходів до проектування та оцінки ефективності роботи основного й допоміжного устаткування як на стадії проектування, так і в процесі експлуатації.

Загальновідомим є те, що на сучасних лінійних і дотискувальних компресорних станціях (ЛКС і ДКС) магістральних газопроводів (МГ) встановлюються блоково-комплектні турбокомпресорні агрегати (ТКА) з використанням у якості приводу одно- та багатокаскадних відцентрових компресорів (ВК) конвертованих авіаційних і суднових газотурбінних двигунів (ГТД) потужністю 4 – 32 МВт. Оцінка ефективності створених ТКА базується на окремих показниках: ефективний ККД ГТД, політропний ККД ВК і масова витрата палива при транспортуванні природного газу. Такий підхід не дозволяє оцінити у повному обсязі ефективність роботи системи та повноту використання підведеної теплової енергії на стадії розробки енерготехнологічної схеми (ЕТС) ТКА.

На сучасному етапі розвитку підходів до визначення ефективності роботи складних технологічних процесів застосовується ексергетичний метод аналізу досконалості функціонування термодинамічних систем. Впровадження такого підходу для комплексної оцінки термодинамічної ефективності блоково-комплектних ТКА дозволить аналізувати їх як енерготехнологічну систему в цілому з урахуванням особливостей кожного з елементів та оцінювати вплив основних і допоміжних систем на ефективність агрегату в цілому. Це дасть можливість досягнення найбільшої економічності при експлуатації агрегату за рахунок максимального узгодження характеристик ГТД та ВК на стадії проектування.

Саме питання удосконалення та адаптації існуючих методик термодинамічного аналізу до вирішення задач у газотранспортній системі, а саме робочих процесів у ТКА, є науковим завданням дисертаційного дослідження і визначає безперечно актуальність наведених у роботі матеріалів.

2. Загальна характеристика роботи

Структура дисертаційної роботи побудована таким чином, що до неї входить вступ, 5 розділів, висновки, 13 додатків і список використаних джерел з 99 найменувань. Загальний обсяг дисертації становить 233 стор.

Вступна частина дисертації у повному обсязі надає інформацію про основні важливі положення роботи – актуальність, мету і задачі дослідження, наукову новизну й практичне значення отриманих результатів, особистий внесок автора, наведено дані про апробацію результатів, публікації за темою роботи.

Перший розділ присвячено докладному опису та аналізу структури й роботи ТКА, що входять до компресорних станцій (КС) магістральних газопроводів.

Проведено аналіз блоково-комплектних агрегатів контейнерного і ангарного типів. Ранжування різних типів ТКА показало, що кожен з них має свої конструктивні особливості та набір складових елементів, які є невід’ємною частиною ТКА та потребують їх врахування для оцінки ефективності термодинамічної системи.

Наглядно та детально виконано опис принципу роботи ЕТС стискання природного газу на лінійних та дотискувальних КС. Наведені експлуатаційні характеристики газоперекачувальних агрегатів на номінальних режимах навантаження, що є дуже важливим для подальшої оцінки досконалості термодинамічної системи. Розглянуто типові ЕТС агрегатів, визначено основні конструктивні особливості, що впливають на їх енергетичну ефективність в цілому.

Аналіз літературних джерел з існуючих рішень визначення термодинамічної ефективності різних енергетичних систем, виконаний у дисертаційній роботі, показав, що ключовим питання є розробка системного підходу на базі ексергетичного аналізу оцінки енергоефективності ТКА, як складної енергоперетворюючої системи, в процесі аналізу різних конструктивних рішень та режимів експлуатації.

Цінність цього розділу полягає у чіткому викладенні обмежень, що ставляться при проектуванні та експлуатації ТКА для ЛКС та ДКС. Проведений аналіз показав недоліки існуючих підходів до оцінки енергетичної ефективності ТКА. На підставі цього сформульовано мету і задачі для проведення наукових досліджень за цією тематикою.

Другий розділ дисертації присвячено аналізу та формулюванню підходів, що використовуються під час проведення розрахункових досліджень.

Наведено чіткий розподіл ексергетичних потоків на «паливо» та «продукт». Такий розподіл для наявності представлено у вигляді схеми розподілу матеріальних та енергетичних потоків у ТКА за системами газотурбінного приводу та ВК.

Велика увага приділяється функціональному і функціонально-ексергетичному підходам оцінки ефективності на стадії передпроектного дослідження та при експлуатації ТКА. Показано, що використання функціонально-ексергетичного підходу дозволить більш системно та більш повно підходити до аналізу ефективності комплексу систем ТКА. Термодинамічний аналіз робочого процесу ТКА на стадії передпроектних досліджень дає можливість виявити вплив параметрів основних і допоміжних підсистем на загальну ефективність ЕТС.

Приділяється увага опису термодинамічних циклів газотурбінного привода та ВК. Висвітлено особливості, що виникають при протіканні робочих процесів у різних системах блоково-комплектного ТКА.

Одержано рівняння для оцінки ексергетичної ефективності ВК при різному виконанні роторної системи ВК, що дозволило визначати вплив допоміжних систем його секцій (корпусів) стиснення на ефективність робочого процесу.

У розділі виведено рівняння для визначення ексергетичного ККД у одно- і двокаскадному виконанні ВК, що враховують вплив витрат ексергії основними та допоміжними системами. Проаналізовано показники та допоміжні системи, що впливають на ексергетичну ефективність роботи ГТД при роботі у складі ТКА. Уточнено аналітичні залежності для визначення ексергетичних ККД основних складових ЕТС агрегату, що враховують застосування різних допоміжних систем. Це дозволяє більш точно оцінювати рівень втрат ексергії в окремих елементах схеми та загальний ексергетичний ККД ТКА.

До безумовної цінності цього розділу варто віднести те, що автор достатньо переконливо показує доцільність впровадження ексергетичного методу оцінки ефективності роботи ТКА як на стадії проектно-конструкторських досліджень, так і для агрегатів, що експлуатуються.

У **третьому розділі** дисертації висвітлюється питання узгодження сумісної роботи компресора та газотурбінного привода на основі системного підходу до аналізу робочого процесу ТКА. Системний підхід при вирішенні цієї задачі дозволяє збалансувати режимні та конструктивні характеристики складових елементів ЕТС на стадії передпроектних досліджень та у процесі експлуатації.

Представлено вплив геометрії лопаткових апаратів, напірних та витратних характеристик на потужність та ефективність роботи компресів. В зв'язку з тим, що ступені з низьконапірними робочими колесами (РК) характеризуються більшим вихідним кутом лопаток РК, це призводить до значного росту відносної потужності при збільшенні витрати робочого тіла. Також показано, що ступені з РК більшої напірності мають більш полого зростання відносної потужності компресора.

Проведено розрахункові дослідження з визначення узгодженості проектного режиму роботи компресора і режиму роботи ТКА. Отримано, що співпадіння оптимального режиму роботи ТКА й розрахункового режиму роботи ВК спостерігається у першій та другій модифікації розглянутих конструкцій компресорів, але з кожною подальшою модифікацією виникає все більша неузгодженість. Це дало можливість виявити, що у випадку застосування високонапірних ступенів ВК більша ефективність досягається при більш високій потужності компресора у порівнянні з проектним його режимом і пропонується комплексне налаштування ВК та ГТД для досягнення оптимуму за інтегральним ККД.

Необхідно відзначити, що автором проведено велику та об'ємну роботу з зіставлення результатів розрахункових характеристик ступеня компресора, отриманих з використанням ANSYS CFX, із проектними даними, які отримані на кафедрі КВХТ С.-Пб. ГПУ, що показало їх задовільний збіг. Експериментальні випробування модельної проточної частини компресора здійснювалися на спеціально створеному аеродинамічному стенді АДС-1250 в складі науково-випробувального комплексу Сумського НВО, що дало можливість одержати інтегральні характеристики його проточної частини. Розбіжність результатів моделювання з фізичним експериментом за політропним ККД не перевищує 5 %.

Слід зазначити, що аналіз ефективності агрегату типу ГПА-Ц-32 із проточними частинами різного типу ВК, проведений автором, дозволив зробити важливий висновок, що застосування низьконапірного ступеня забезпечує узгодження характеристик ГТД й ВК, а також досягнення більш високої економічності за паливними показниками в порівнянні із ТКА, укомплектованого ВК з високонапірним робочим ступенем.

Четвертий розділ включає у себе детальний опис схеми експериментального стенду замкнутого контуру блоку випробувальних стендів СМНВО для визначення режимних характеристик ТКА. Наведено безрозмірні розрахункові й експериментальні характеристики проточної частини компресора типу НЦВ-6,3/56-1,45, які показали задовільне співпадіння. Відзначено також, що для аналізу роботи ГТД використовуються результати випробувань на експериментальному стенді ПАО «Мотор–Січ». Викладено основні параметри, що необхідні для оцінки ефективності роботи силової турбіни у складі ГТД.

Автором проведено аналіз політропного ККД та ексергетичної ефективності компресора у складі агрегату ГПА-Ц-6,3А/56-1,45. Визначено, що значення політропного ККД мають проміжне положення, тому що він враховує в певній мірі вплив підвищення температури природного газу в процесі його компримування.

Аналіз ефективності робочого процесу агрегату виконується шляхом визначення ексергетичного ККД з використанням абсолютної та відносної величини втрат ексергії у складових елементах енерготехнологічної схеми. Автором наведені числові значення абсолютних і відносних втрат ексергії, основні параметри і показники ефективності роботи агрегату та його елементів стосовно результатів експериментальних та розрахункових досліджень ТКА. Показано, що при розрахункових і експериментальних газодинамічних характеристиках секцій стиснення спостерігається певна розбіжність режимів роботи ступенів стиснення компресора (ССК), ВК і ТКА по значенню максимального ексергетичного ККД. На думку автора це зумовлене тим, що набір устаткування в дослідному зразку ТКА і набір устаткування стенду різняться за технічними характеристиками. Як наслідок оцінки ексергетичної ефективності установки отримано, що найбільша паливна ефективність досягається при максимальному ККД агрегату.

Здобувачем виконано оцінку вкладу у загальні втрати ексергії кожного елемента ТКА з однокаскадним ВК. Показано, що найменші відносні втрати ексергії спостерігаються в ССК. Втрати ексергії в апараті повітряного охолодження (АПО), більшою часткою, пов'язані з «термічною» складовою та є теж незначними. Найбільша частка втрат ексергії припадає на газотурбінний привід (ГТП) компресора, що пов'язано із значним викидом теплоти з відхідними газами. Автор вірно відмічає, що ця теплота може ефективно використовуватися для виробництва теплової та/або електричної енергії без додаткового спалювання палива.

За результатами порівняльного аналізу ексергетичної ефективності одно- та двокаскадних ВК для дотискувальних ТКА показано, що найбільш раціональним може бути впровадження двокаскадних ВК в залежності від ринкової вартості паливного газу.

Предметом розгляду **в п'ятому розділі** є аналіз ефективності роботи ТКА різної конструкції в широкому діапазоні експлуатаційних параметрів. Проаналізовано та побудовано відповідні залежності впливу температури навколишнього середовища та природного газу перед ВК на ефективність роботи ГТП і ВК, відповідно. Побудовані залежності показали, що підвищення температури зовнішнього повітря призводить до зменшення ефективності роботи ЕТС компримування природного газу в ВК.

Проаналізовано ефективність існуючих агрегатів потужністю 6,3 – 32 МВт. За результатами аналізу виявлено, що з точки зору потужності та ефективності для підвищення економічності та конкурентоспроможності газотранспортної системи України, при її модернізації, доцільно впроваджувати агрегат ГПА-Ц-12А/76-1,5, як найбільш ефективний в цьому класі блоково-комплектних агрегатів з приводом простого робочого циклу.

Виконані розрахункові дослідження з оцінки життєвого циклу одно- та двокаскадних ТКА. Результати показали, що значний вплив на вибір варіанту чинить вартість природного газу, який є основною складовою експлуатаційних витрат. Також важливим є те, що термодинамічний аналіз ефективності та оцінка вартості життєвого циклу дозволили визначити найбільш доцільну ЕТС дотискувального ТКА при різній ринковій вартості паливного газу для ГТП.

Заключним пунктом розділу сформульовано та надано рекомендації щодо удосконалення процесу науково-дослідних робіт на етапі передпроектних досліджень агрегатів газової промисловості для ЛКС і ДКС.

3. Наукова новизна роботи

У дисертаційній роботі розв'язано важливу наукову проблему комплексної оцінки термодинамічної ефективності ТКА шляхом розвитку та адаптації існуючих ексергетичних підходів до аналізу технологічних процесів у сфері газотранспортного машинобудування. Нові наукові результати полягають у наступному:

- отримала розвиток методика термодинамічного аналізу робочого процесу ТКА, що використовуються при транспортуванні природного газу, як складної енерготехнологічної системи з використанням ексергетичного підходу;
- вперше турбокомпресорний агрегат з ГТП детально розглядається як складна термодинамічна система, на інтегральний ККД якої впливають не тільки ВК і ГТД, а й такі важливі елементи як: система охолодження, мастильна і утилізаційна системи теплоти вихлопних газів агрегату, ущільнюючі системи роторів ВК різного типу та інше;
- на основі результатів комплексного термодинамічного аналізу сформульовані методичні підходи до вибору найбільш ефективних ЕТС агрегатів з використанням термодинамічних і техніко-економічних показників;
- розроблено підхід до вибору геометричних характеристик проточної частини ВК з метою одержання найбільш раціональних системних характеристик ТКА при наявності обмежень, що визначаються існуючими серійними конструкціями ГТД;
- на основі функціонального та функціонально-ексергетичного підходів до побудови та аналізу системної характеристики ТКА запропоновано новий підхід до вибору сумісних режимів роботи ВК і ГТД у складі ТКА та оптимізації режимів його експлуатації;
- отримано новий критерій оцінки інтегральної ефективності ТКА – коефіцієнт витрати паливного газу, який дає можливість пов'язати продуктивність ТКА, його економічність за витратами палива та геометричними характеристиками проточної частини газового компресора з урахуванням його газодинамічної ефективності, що важливо на стадії передпроектних оцінок при створенні нових високоефективних ТКА на основі конвертованих ГТД та ВК.

4. Практична цінність роботи

Вдосконалена в дисертації методологія ексергетичного аналізу дозволяє аналізувати та комплексно підходити до оцінки термодинамічної ефективності ЕТС блоково-комплектних агрегатів, визначення вимог до розробки проточних частин компресорів і виявлення оптимальних режимів сумісної роботи конвертованих ГТД та ВК. Завдяки адаптованому підходу з'явилася можливість оцінювати степінь погодженості енергетичних характеристик ТКА, ГТД і ВК, а також визначати показники паливної ефективності агрегату на стадії виконання передпроектних досліджень. У сукупності це дає можливість оцінювати ефективність нових проектних і конструкторських рішень з вдосконалення ТКА та розробити рекомендації по зниженню енерговитратності їх робочих процесів.

Результати наукових досліджень використані на СМНВО при виборі основних технічних рішень в процесі проектування ВК перспективного агрегату потужністю 32 МВт.

Вдосконалені моделі та адаптовані підходи застосовуються у навчальному процесі підготовки бакалаврів та магістрів факультету технічних систем та енергоефективних технологій СумДУ у курсі «Турбокомпресорні установки з газотурбінним приводом» для студентів спеціальності 142 «Енергетичне машинобудування».

5. Повнота викладу в опублікованих роботах

Основні результати дисертації викладено у 15 друкованих працях: 6 статей у спеціалізованих фахових виданнях, що затверджені МОН України, 1 стаття в іноземному журналі, 3 публікації у матеріалах конференцій, а також 5 статей в інших наукових журналах України.

Автореферат повністю відповідає основному змісту дисертації.

6. Обґрунтованість і достовірність результатів і висновків

Обґрунтованість і достовірність отриманих результатів полягає у використанні сучасних підходів до визначення термодинамічної ефективності технологічного процесу компримування природного газу, коректному використанні математичного апарату і сучасних обчислювальних методів при визначенні геометричних та газодинамічних характеристик проточних частин компресорів, а також, що результати розрахункової моделі робочого процесу ТКА верифіковано з використанням результатів натурних випробувань.

7. Зауваження по дисертаційній роботі

1. У роботі поставлено задачу «виконати верифікацію розрахункової моделі робочого процесу ТКА на основі системного підходу з використанням результатів випробувань агрегату ГПА-Ц-6,3А/56-1,45». Але не зрозуміло яка саме модель верифікується та, що розроблена автором або існуюча, яка адаптується під умови обраного агрегату?

2. В тексті дисертації (стор. 63) відзначено, що рівень економічності ГТД за величиною η_e (при потужності СТ 4,0 – 50 МВт) знаходиться в діапазоні 26,5 – 42,0 %, але з рис. 1.19 бачимо, що економічність не перевищує 39 %. Також доцільно було б пояснити чому, представлений в табл.1.9 ГТД ДУ71Л виробництва ДП "Зоря"- "Машпроект" має майже на 10 % (абсолютних) вищу ефективність ніж інші двигуни цього класу потужності.

3. В дисертації не має чіткого пояснення яким чином розраховується ВК при створенні нового ТКА. Не наведені програми і методики обрахунку газодинамічних та міцнісних характеристик компресора.

4. На стор. 78 відзначено, що живлення електроенергією допоміжних систем ГТД здійснюється шляхом підводу від загальностанційних систем електроживлення або від мотор-генератора двигуна. Чи виконувався вибір способу електроживлення енерготехнологічної схеми шляхом порівняння термодинамічної ефективності варіантів?

5. В дисертації розроблено методику термодинамічного аналізу енерготехнологічних схем ТКА різної конфігурації та потужності. Але автор не пояснює чи можна застосувати розроблену методику термодинамічного аналізу енерготехнологічних схем ТКА для агрегатів іншої конфігурації та потужності.

6. Задача пошуку термодинамічної ефективності вирішується для ТКА як окремої одиниці, або як частини компресорної станції в складі якої є декілька ТКА?

7. Потребує пояснення доцільність використання коефіцієнта перетворення ексергії або коефіцієнта корисної дії при термодинамічному аналізі ефективності апарата повітряного охолодження в складі ТКА.

8. Потребує пояснення з чим пов'язана різка зміна масової витрати газу за температури навколишнього середовища +15 °С у табл. 5.2?

9. Протягом усього тексту зустрічаються незначні друкарські помилки.

8. Висновки. Виявлені недоліки та наведені зауваження не впливають на загальне позитивне враження від роботи. Дисертаційна робота Тертишного Ігоря Миколайовича «Удосконалення конструкції блоково-комплектних турбокомпресорних агрегатів з газотурбінним приводом для компресорних станцій магістральних газопроводів» за своїм змістом відповідає паспорту спеціальності 05.05.16 – Турбомашини і турбоустановки. Вона є закінченою науково-технічною роботою, в якій розв'язано важливу наукову задачу та отримано нові науково обґрунтовані теоретичні й практичні результати, які є важливими для аналізу, вдосконалення та подальшого розвитку газотурбінних агрегатів для компресорних станцій магістральних газопроводів. Дисертаційна робота повністю відповідає вимогам пунктів 9, 11, 12 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р. № 567 (зі змінами) щодо дисертаційних робіт, а її автор, Тертишний Ігор Миколайович, заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.16 – Турбомашини і турбоустановки.

Офіційний опонент
старший науковий співробітник
відділу оптимізації процесів
та конструкцій турбомашин
Інституту проблем машинобудування
ім. А.М. Підгорного НАН України,
кандидат технічних наук,
старший науковий співробітник



О.В. Сенецький

Підпис к.т.н. Сенецького Олександра Володимировича засвідчую.
Учений секретар
д. т. н., с. н. с.



К. В. Максименко-Шейко