

Національна академія наук України

Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного

**Тертишний Ігор Миколайович**



УДК 621.515

**УДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ БЛОКОВО-КОМПЛЕКТНИХ  
ТУРБОКОМПРЕСОРНИХ АГРЕГАТІВ З ГАЗОТУРБІННИМ ПРИВОДОМ  
ДЛЯ КОМПРЕСОРНИХ СТАНЦІЙ МАГІСТРАЛЬНИХ ГАЗОПРОВОДІВ**

Спеціальність 05.05.16 – «Турбомашини та турбоустановки»

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків – 2018

Дисертація є рукописом.

Робота виконана в Публічному акціонерному товаристві «Сумське машинобудівне науково-виробниче об'єднання»

**Науковий керівник:**

доктор технічних наук, старший науковий співробітник  
**Парафійник Володимир Петрович,**  
Публічне акціонерне товариство  
«Сумське машинобудівне науково-виробниче об'єднання»,  
провідний науковий співробітник

**Офіційні опоненти:**

доктор технічних наук, професор,  
**Єпіфанов Сергій Валерійович,**  
Національний аерокосмічний  
університет ім. М. Є. Жуковського  
"Харківський авіаційний інститут",  
завідувач кафедри конструкції авіаційних двигунів

кандидат технічних наук  
**Сенецький Олександр Володимирович**  
Інститут проблем машинобудування  
ім. А. М. Підгорного НАН України,  
старший науковий співробітник відділу  
оптимізації процесів та конструкції турбомашин

Захист відбудеться «25» жовтня 2018 р. о 14<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.180.02 в Інституті проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України за адресою: 61046, м. Харків, вул. Пожарського, 2/10.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Інституту проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України за адресою: 61046, м. Харків, вул. Пожарського, 2/10.

Автореферат розісланий «21» вересня 2018 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради Д 64.180.02  
кандидат технічних наук,  
старший науковий співробітник



С. В. Альохіна

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** У складі газотранспортної системи (ГТС) України для транспорту природного газу (п.г.) по магістральним газопроводам (МГ) ключову роль відіграють лінійні і дотискувальні компресорні станції (КС), створені із застосуванням турбокомпресорних агрегатів (ТКА).

У вітчизняній практиці блоково-комплектні ТКА в останні десятиліття створюються на основі конвертованих авіаційних і суднових газотурбінних двигунів (ГТД) потужністю 4 – 32 МВт із одно- і багатокаскадними відцентровими компресорами (ВК). ТКА є енерготехнологічними системами, робочий процес яких супроводжується складними фізичними перетвореннями. В агрегатах відбувається перетворення хімічної енергії п.г. у механічну енергію привода, очищення, компримування й охолодження п.г. При цьому показники ефективності основних енергоперетворюючих систем (ГТД, ВК) відрізняються по фізичній сутності і мають принципові відмінності.

У нормативній документації інтегральні критерії оцінки ефективності ТКА, як енерготехнологічної системи, відсутні, а його енергетична ефективність оцінюється на основі окремих показників: ефективного коефіцієнта корисної дії (ККД) ГТД, політропного ККД ВК і масових витрат п.г. в агрегаті. Ці показники малопридатні при проектуванні й порівняльному аналізі ефективності енерготехнологічних схем (ЕТС) агрегата, а також при виборі спільних режимів роботи ГТД і ВК із урахуванням роботи інших систем агрегата.

З урахуванням особливостей робочого процесу газотурбінних ТКА доцільним є застосування системного підходу до його аналізу і вибору показників ефективності на основі ексергетичного методу. Такий підхід дозволяє: аналізувати ефективність блоково-комплектних ТКА як енерготехнологічної системи, визначати його системну характеристику й оптимальні режими роботи, вплив основних і допоміжних систем на ефективність агрегата, узгодити характеристики ГТД і ВК на стадії проектування із метою досягнення найбільшої економічності при роботі агрегата.

При виконанні даного дослідження використаний внесок у розвиток ексергетичного методу аналізу таких учених як В. М. Бродяньський, Д. П. Гохштейн, Т. В. Морозюк, Дж. Тсатсароніс, Я. Шаргут та інших. Використані також результати досліджень ефективності газотурбінних ТКА, термотрансформаторів, компресорних і дизельних установок, представлених у публікаціях таких авторів як: В. Є. Євдокимов, В. І. Євєнко, А.П. Марченко, В. П. Парафійник, І. І. Петухов, С. Г. Соколов, О. В. Тарасов, В. О. Тарасова, С. Д. Фролов, Д. Х. Харлампіді, В. М. Чобенко, а також інших фахівців ПАТ «Сумське НВО» (СМНВО), ІПМаш ім. А. М. Підгорного НАНУ та кафедри аерокосмічної теплотехніки НАКУ-«ХАІ» ім. М. Є. Жуковського.

Однак у відомих роботах не в повному обсязі розглядалася робота ТКА як енерготехнологічної системи, що потребує комплексного термодинамічного аналізу та не аналізувалися ЕТС агрегатів. Питання вибору оптимальних

режимів роботи ГТД і ВК не досліджувалося а також не вивчався вплив ВК і ГТД на системну характеристику агрегата.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційне дослідження проводилося в рамках програм Енергетичної стратегії України на період 2010 – 35 р.р. "Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність", а також відповідно до планів НДР і ДКР у СМНВО: «Створення ряду модельних ступенів підвищеної ефективності для відцентрових компресорів» (2013 р., № 84005039), «Створення високоефективного відцентрового компресора з осерадіальним робочим колесом для ГПА потужністю 32 МВт» (2013 р., № 84005037).

**Мета і завдання дослідження.** Метою дослідження є розвиток науково-методичних основ системного аналізу ефективності робочого процесу блоково-комплектних ТКА з використанням методів ексергетичного аналізу ЕТС агрегатів; удосконалення методики узгодження характеристик ГТП і ВК для досягнення оптимальних режимів роботи агрегата, виходячи з особливостей газодинамічної характеристики ВК і системної характеристики ТКА; вирішення практичних завдань щодо вдосконалення конструкції агрегата на основі результатів термодинамічного аналізу його робочого процесу. Для досягнення поставленої мети в дисертаційній роботі необхідно вирішити наступні завдання:

- удосконалити методику термодинамічного аналізу робочого процесу ТКА, як складної енергоперетворюючої системи, уточнити аналітичні залежності для визначення ексергетичних ККД різних елементів у складі ТКА;
- виконати верифікацію розрахункової моделі робочого процесу ТКА на основі системного підходу з використанням результатів випробувань агрегата ГПА-Ц-6,3А/56-1,45;
- виконати аналіз впливу геометричних і газодинамічних характеристик ВК на системну характеристику ТКА з метою досягнення оптимального режиму його роботи з урахуванням обмежень, що виникають при існуючій конструкції ГТД;
- обґрунтувати методику вибору енерготехнологічної схеми дотискувального агрегату на основі функціонально-ексергетичного підходу і даних вартості життєвого циклу;
- виконати аналіз термодинамічної та паливної ефективності газотурбінних ТКА потужністю 6,3 – 32 МВт у широкому діапазоні робочих параметрів, у т.ч. при зміні кліматичних умов експлуатації;
- сформулювати рекомендації з удосконалення процесу проектування ТКА.

*Об'єкт дослідження* – робочий процес і режими роботи ВК і ТКА газової промисловості для лінійних і дотискувальних КС при їхньому функціонуванні в широкому діапазоні робочих параметрів.

*Предмет дослідження* – показники термодинамічної досконалості блоково-комплектних газотурбінних компресорних агрегатів МГ, які створюються на основі ВК.

**Методи дослідження:** термодинамічний аналіз системних характеристик ВК і ТКА з використанням функціонального й функціонально-

ексергетичного підходів до оцінки ефективності агрегата; розрахунковий аналіз ефективності робочого процесу ТКА з використанням сучасних розрахункових засобів; експериментальний метод оцінки ефективності агрегата і його систем.

**Наукова новизна отриманих результатів.** Виконані в дисертаційній роботі дослідження дозволили отримати нові наукові результати в сфері газотранспортного машинобудування, що створюється на основі турбомашин:

- отримала розвиток методика термодинамічного аналізу робочого процесу ТКА природного газу, як складної енерготехнологічної системи з використанням ексергетичного підходу; вперше у вітчизняній літературі газотурбінний агрегат детально розглядався як складна термодинамічна система, на інтегральний ККД якої впливають не тільки ВК і ГТД, а й інші елементи в її складі: система охолодження, мастильна і утилізаційна система теплоти вихлопних газів агрегата, ущільнюючі системи роторів ВК різного типу та інше;

- на основі результатів системного термодинамічного аналізу створені наукові основи та сформульовані методичні підходи для вибору найбільш ефективних ЕТС агрегатів з використанням термодинамічних та техніко-економічних показників;

- розроблено підхід до вибору геометричних характеристик проточної частини ВК з метою одержання найбільш доцільних системних характеристик ТКА при наявності обмежень, що визначаються характеристиками існуючих конструкцій 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 природного газу;

- отримано новий критерій оцінки інтегральної ефективності ТКА – коефіцієнт витрат паливного газу, який дає можливість пов'язати продуктивність ТКА, його економічність по витратам палива та геометричні характеристики проточної частини (ПЧ) газового компресора, тобто його газодинамічні характеристики, що важливо на стадії передпроектних науково-дослідних робіт (НДР) по створенню нових високоефективних ВК і ТКА.

#### **Практичне значення отриманих результатів.**

У роботі на основі системного аналізу робочого процесу блоково-комплектних ТКА для ЛКС і ДКС одержані нові дані, що дозволяють аналізувати ЕТС агрегатів, визначати вимоги до розробки ПЧ компресора і виявляти можливості досягнення оптимальних режимів роботи агрегата. З'явилася можливість оцінити ступінь погодженості характеристик ГТД і ВК, а також визначати показники паливної ефективності агрегата на стадії виконання передпроектних НДР. У сукупності це дозволяє оцінювати ефективність нових проектних і конструкторських рішень по вдосконаленню ТКА та розробити рекомендації по зниженню енергозатратності робочого процесу ТКА, а також покращенню організації процесу НДР і дослідно-конструкторських робіт (ДКР) на передпроектній стадії робіт.

Основні результати виконаних досліджень були використані в СМНВО при виборі основних технічних рішень при проектуванні ВК перспективного агрегата потужністю 32 МВт. Результати дисертаційної роботи

використовуються в навчальному процесі кафедри технічної теплофізики СумДУ при вивченні студентами навчальної дисципліни «Турбокомпресорні установки з газотурбінним приводом».

**Особистий внесок здобувача.** Всі основні наукові результати дисертаційної роботи отримані безпосередньо здобувачем [1 – 15]. У роботах, опублікованих у співавторстві, авторові належать дані про результати:

- газодинамічних розрахунків ВК із різними геометричними параметрами ПЧ; визначення інтегральної ефективності ЕТС агрегатів і їх аналізу [1, 2];
- розрахункового обґрунтування доцільності застосування газотурбінного привода ВК для агрегатів ЛКС у складі перспективної конструкції агрегата типу ГПА-Ц-12А потужністю 12 МВт [3];
- розрахункового аналізу схем ВК потужністю 32 МВт із різним типом опор і ущільнень роторної системи на основі матеріального, потужнісного та ексергетичного балансів, а також дані ексергетичного аналізу ефективності ВК різного типу [4, 13];
- порівняльного термодинамічного аналізу ефективності дотискувального ТКА з одно- і двокаскадним ВК і аналізу отриманих розрахункових даних [5, 6];
- термодинамічного аналізу ефективності блоково-комплектних агрегатів на основі розрахункових і експериментальних характеристик систем агрегата типу ГПА-Ц-6,3А потужністю 6,3 МВт [7 – 10, 12, 15];
- аналізу основних результатів робіт по вибору сумісних режимів роботи ГТД і ВК при створенні блоково-комплектних ТКА різного призначення [11, 14].

**Апробація результатів роботи.** Основні положення й результати дисертаційного дослідження доповідалися й обговорювалися на наступних конференціях: 6-й МНТК "Молодь в авіації: нові рішення і передові технології" (Україна, Запоріжжя-Алушта, 22 – 24 травня 2012 р.); МНТК молодих вчених і студентів "Техніка і прогресивні технології в нафтогазовій інженерії – 2012" (Україна, Івано-Франківськ, 5 – 7 листопада 2012 р.); IX МНТК «Сучасні проблеми холодильної техніки і технології» (Україна, Одеса, 10 – 12 вересня 2013 р.); XV і XVI МНТК з компресоробудування (Росія, Казань 19 – 20 липня 2011 р; С.-Петербург, 23 – 25 вересня 2014 р.); III Всеукраїнській міжвузівській науково-технічній конференції (Україна, Суми, 22 – 25 квітня 2014 р.); Міжнародні молодіжні науково-технічні читання ім. О. Ф. Можайського (Україна, Запоріжжя – Приморськ, 15 – 17 травня 2018 р.).

**Публікації.** 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 у наукових журналах України.

**Структура дисертації.** Дисертаційна робота складається із вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел, 13 додатків. Повний обсяг роботи становить 233 сторінки, у тому числі: 126 сторінок основного тексту, 70 рисунків, з яких 23 на окремих аркушах, 13 таблиць по тексту, список використаних джерел з 99 найменувань на 13 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність теми і представлена загальна характеристика роботи.

У першому розділі розглянуті ЕТС агрегатів (рис. 1) і конструктивні особливості устаткування для їхньої реалізації. Показано, що блоково-комплектні ТКА п.г. є складними енерготехнологічними системами, а реалізація їхніх робочих процесів характеризується розмаїтністю енергоперетворень і широким діапазоном значень основних параметрів його систем. Для лінійних компресорних станцій (ЛКС) агрегати створюються, як правило, з використанням однокорпусних ВК (рис. 2) з тиском нагнітання до 12 МПа в діапазоні  $\pi_K = 1,25 - 1,7$  і рівнем  $\eta_{\Pi} = 0,74 - 0,86$ . Для дотискувальних КС (ДКС) агрегати можуть комплектуватися двокаскадними ВК із відношенням тисків понад 1,7. Принципова ЕТС агрегата для ДКС представлена на рис.1. По такій же схемі можуть створюватися агрегати для ЛКС, але з однокаскадним ВК і без мультиплікатора, а також агрегати підземних сховищ газу.

До основних енергоперетворюючих систем ТКА відносяться газотурбінні приводи (ГТП) потужністю 4 – 32 МВт із  $\eta_e = 0,265 - 0,385$ , відповідно, а також ВК. У випадку застосування двокаскадного ВК у його складі застосовується система охолодження п.г. з апаратами повітряного охолодження (АПО), а також сепаратори (С). До допоміжних систем відносяться: паливна система приводного двигуна; системи змащення, електро- і теплопостачання агрегату; пожежогасіння; система автоматизованого управління і регулювання (САУ і Р); системи утилізації теплоти вихлопних газів (УТВГ); вентиляції турбоблока та інші.

Оцінка ефективності ТКА, як складних енергоперетворюючих систем, може виконуватися на основі системного підходу з використанням інтегрального ексергетичного ККД агрегату ( $\eta_{ex}^{TKA}$ ). Однак у нормативній документації такий показник відсутній. Використовуються критерії ефективності тільки його основних систем (ВК і ГТД). Особливостями політропного ККД ( $\eta_{\Pi}$ ) для ВК і ефективного ККД ГТД ( $\eta_e$ ) є те, що кожний з них оцінює робочий процес окремої турбомашини, значно відрізняється по своїй фізичній сутності і прямим чином не може бути використаний при системному аналізі ЕТС. При системному аналізі ТКА необхідно використовувати критерії, що мають єдину термодинамічну основу. Використання такого підходу дозволяє обґрунтовано аналізувати вплив основних і допоміжних систем на ефективність агрегату при його проектуванні з метою підвищення економічності ТКА.

Існуючий метод вибору спільних режимів роботи ГТД і ВК заснований на Першому законі термодинаміки. Відповідно до нормативної документації при проектуванні ВК його розрахункова потужність ( $N_{BK}$ ) і частота обертання ротора ( $n_p$ ) повинні бути менше номінальних параметрів ГТД. Іншим відомим підходом до узгодження роботи ГТД і ВК є умова забезпечення рівності

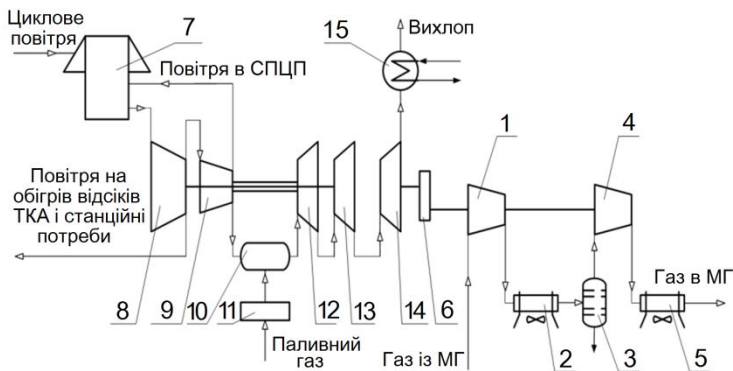


Рис. 1. Принципова ЕТС агрегата п.г. із двокаскадним ВК у складі ДКС: 1– секція стиснення (ССК) першого каскаду; 2– проміжний АПО; 3– С; 4– ССК другого каскаду; 5 – кінцевий АПО; 6– мультиплікатор; 7– комплексний повітряочисний пристрій (КПОУ); 8 – компресор низького тиску ГГ; 9 – компресор високого тиску ГГ; 10 – камера згоряння ГТД; 11 – блок підготовки п.г.; 12 – турбіна високого тиску ГГ; 13 – турбіна низького тиску ГГ; 14 – силова турбіна (СТ) двигуна; 15 – УТВГ

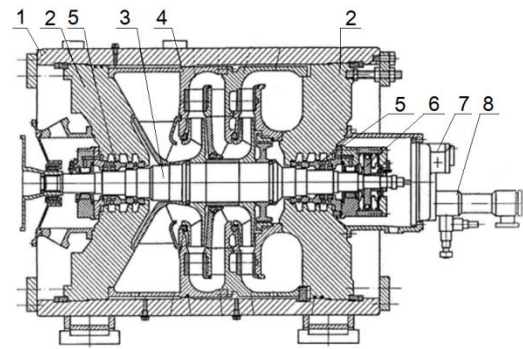


Рис. 2. Відцентровий компресор НЦ-16/76-1,44 потужністю 16 МВт агрегату ГПА-Ц-16/76-1,44:1 – корпус; 2 – кришки корпусу; 3 – ротор; 4 – статорні елементи; 5 – кінцеві ущільнення ротора; 6 – мастильні підшипники; 7 –насос системи змащення; 8 – мастильний насос системи ущільнення

коефіцієнтів питомої швидкості силових турбін (СТ) двигуна і ВК. Однак для виконання цієї вимоги, згідно даним ГП НПКГ «Зоря»-«Машпроект», необхідні зміни конструкції газогенератора (ГГ) двигуна, що при створенні ГТД для приводу нового ВК у складі агрегату є досить проблематичним. У зв'язку з вищевикладеним у даній роботі запропонована нова методика вибору спільних режимів роботи ВК і ГТД у складі ТКА п.г., що розроблена із застосуванням ексергетичного методу аналізу ефективності ТКА.

У **другому розділі** виконано аналіз особливостей робочого процесу ТКА п.г., створених на основі ГТП і ВК. Для робочого процесу газотурбінного ТКА характерне споживання й перетворення різних видів енергії (рис. 3). Виходячи з положень ексергетичного аналізу, енергоресурси ТКА можна розділити на ексергетичні потоки «палива» і «продукту». До «палива» відносяться потік п.г., електроенергії і теплоти, які використовуються для забезпечення роботи систем ВК, ГТП і ТКА. «Продуктом» є потоки технологічного газу, стисненого повітря ГГ двигуна, а також теплота в.г. ГТД або іншого теплоносія, який утилізується.

З використанням ВК п.г. у складі ТКА реалізуються процеси очищення, стиснення і охолодження газу. Компримування забезпечується за рахунок перетворення механічної енергії ГТД у потенційну енергію стисненого газу.



Робота допоміжних систем ВК, ГТП і АПО супроводжується споживанням електроенергії, стисненого повітря, мастила і т.д. (рис. 3).

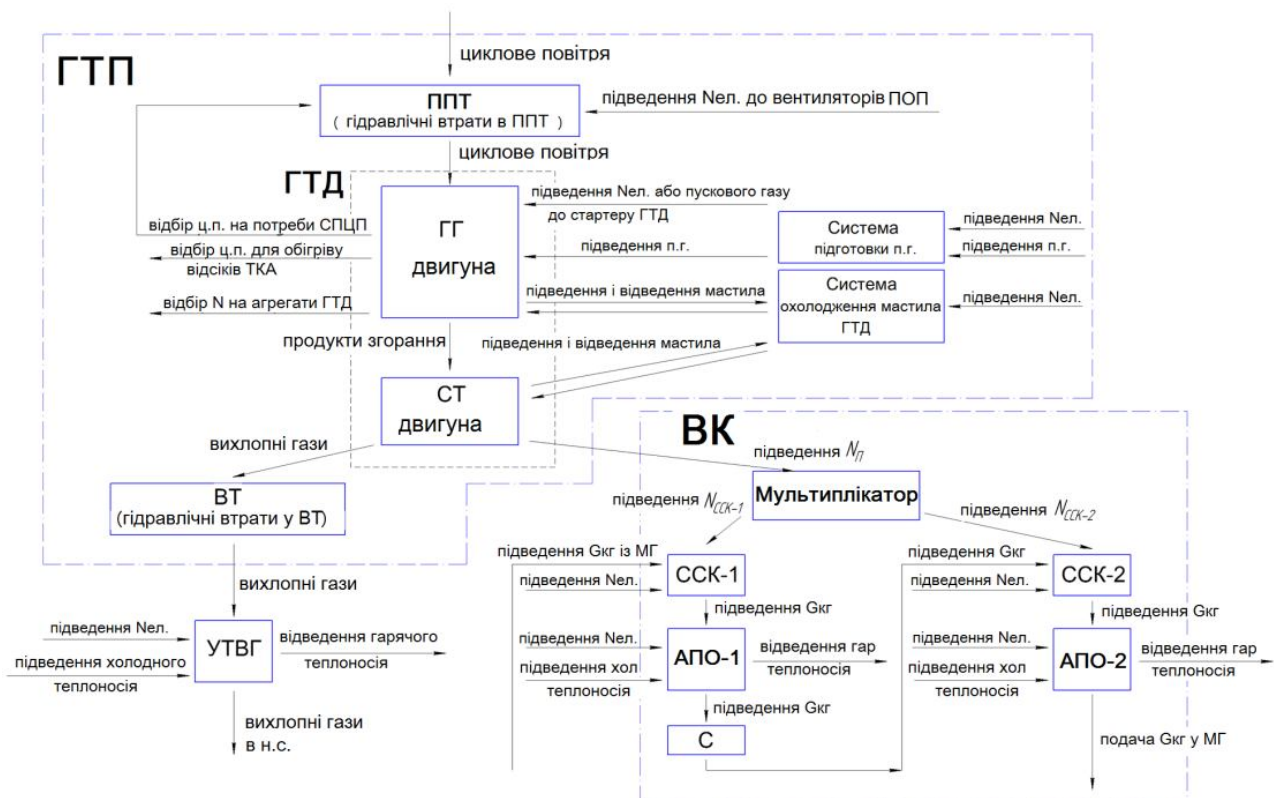


Рис. 3. Схема розподілу матеріальних і енергетичних потоків при реалізації робочого процесу ТКА п.г.

Системний аналіз ефективності характеристик ТКА може виконуватися з використанням функціонального і функціонально-ексергетичного підходів. При цьому аналіз енергоперетворень може бути виконаний як на основі традиційних показників ( $\eta_e$ ,  $\eta_{\Pi}$  та інші) (при функціональному підході), так і з використанням ексергетичних критеріїв ефективності ( $\eta_{ex}^{BK}$ ,  $\eta_{ex}^{ГТП}$ ,  $\eta_{ex}^{ТКА}$  і т.д.) – при функціонально-ексергетичному підході до аналізу системних характеристик. Функціонально-ексергетичний підхід заснований на ексергетичному методі і дозволяє аналізувати ефективність агрегату і його елементів (рис. 3). Визначення показників ефективності секцій (корпусів), каскадів (сукупність ССК, АПО і С) стиснення, ВК із різними типами роторної системи і ТКА виконується на основі аналізу матеріального, енергетичного та ексергетичного балансів. Загальне рівняння для визначення ексергетичного ККД секції стиснення ВК із різними типами опор і ущільнень роторних систем має вигляд

$$\eta_{ex}^{ССК} = (E_{КГ}^{вих} - E_{КГ}^{вх}) / (N_{СП} + \Sigma E_{доп}^{ССК}), \quad (1)$$

де  $E_{КГ}^{вих}$ ,  $E_{КГ}^{вх}$  – потоки ексергії технологічного газу на виході і вході ВК;  $N_{СП}$  – механічна потужність, що споживається компресором;  $\Sigma E_{доп}^{ССК}$  – сумарний потік ексергії, що споживається допоміжними системами ВК має вигляд:

– для корпусу стиснення з опорами і ущільненнями роторної системи в мастильному виконанні

$$\Sigma E_{\text{доп}}^{\text{ССК}} = N_{\text{МН}} + N_{\text{В}}^{\text{МО}}, \quad (2)$$

де  $N_{\text{МН}}$  – потужність мастильних насосів;  $N_{\text{В}}^{\text{МО}}$  – потужність вентиляторів АПО блоку мастилоохолодження;

– для корпусу в безмастильному виконанні

$$\Sigma E_{\text{доп}}^{\text{ССК}} = E_{\text{БГ}}^{\text{ВХ}} + E_{\text{РП}}^{\text{ВХ}} + N_{\text{К}}^{\text{РП}} + N_{\text{ЕМП}}, \quad (3)$$

де  $E_{\text{БГ}}^{\text{ВХ}}$ ,  $E_{\text{РП}}^{\text{ВХ}}$  – потоки ексергії буферного газу і роздільного повітря на вході в торцеві газодинамічні ущільнення (ТГДУ);  $N_{\text{К}}^{\text{РП}}$  – потужність, що споживається компресором подачі повітря для розділення порожнин між ТГДУ і підшипниками;  $N_{\text{ЕМП}}$  – потужність, що споживається електромагнітними підшипниками (ЕМП);

– для корпусу стиснення в комбінованому виконанні

$$\Sigma E_{\text{доп}}^{\text{ССК}} = E_{\text{БГ}}^{\text{ВХ}} + E_{\text{РП}}^{\text{ВХ}} + N_{\text{К}}^{\text{РП}} + N_{\text{МН}}. \quad (4)$$

Аналіз матеріального балансу, балансу потужностей і ексергетичного балансів агрегату, ВК, ГТД та ін., раніше виконані дослідження дозволили одержати уточнені рівняння для розрахункової моделі робочого процесу і ексергетичного ККД каскадів стиснення і ВК, ГТП і ТКА в наступному виді:

– ексергетичний ККД каскаду стиснення

$$\eta_{\text{ex}}^{\text{КСК}} = \sigma_{\text{ex}}^{\text{С}} \cdot \sigma_{\text{ex}}^{\text{АПО}} \cdot (\eta_{\text{ex}}^{\text{ССК}} \cdot \lambda_{\text{ССК}} + \lambda_{\text{АПО}}), \quad (5)$$

де  $\sigma_{\text{ex}}^{\text{С}}$ ,  $\sigma_{\text{ex}}^{\text{АПО}}$  – коефіцієнти перетворення ексергії в С і АПО, відповідно;  $\lambda_{\text{ССК}}$ ,  $\lambda_{\text{АПО}}$  – частки витрат ексергії в ССК і АПО по відношенню до сумарного потоку ексергії на вході в КСК;

– ексергетичний ККД двокаскадного ВК

$$\eta_{\text{ex}}^{\text{ВК}} = \eta_{\text{ex}}^{\text{КСК}_1} \cdot \lambda_{\text{КСК}_1} + \eta_{\text{ex}}^{\text{КСК}_2} \cdot \lambda_{\text{КСК}_2} = \sum_{i=1}^2 \eta_{\text{ex}}^{\text{КСК}_i} \cdot \lambda_{\text{КСК}_i}, \quad (6)$$

де  $\eta_{\text{ex}}^{\text{КСК}_1}$ ,  $\eta_{\text{ex}}^{\text{КСК}_2}$  – ексергетичні ККД каскадів стиснення;  $\lambda_{\text{КСК}_1}$ ,  $\lambda_{\text{КСК}_2}$  – частки витрат ексергії в КСК;

– ексергетичний ККД газотурбінного приводу

$$\eta_{\text{ex}}^{\text{ГТП}} = \frac{N_{\text{СТ}} + E_Q^{\text{УТВГ}} + N_{\text{М-Г}}}{G_{\text{ПГ}} \cdot e_{\text{Х}}^{\text{ПГ}} (1 + \delta) + \sum_{i=1}^n N_i^{\text{Ел}} + E_Q^{\text{ПГ}}}, \quad (7)$$

де  $N_{\text{СТ}}$  – потужність СТ;  $N_{\text{М-Г}}$  – потужність мотор-генератора;  $E_Q^{\text{УТВГ}}$  – ексергія тепла в.г.;  $G_{\text{ПГ}}$  – масова витрата п.г.;  $e_{\text{Х}}^{\text{ПГ}}$  – питома хімічна ексергія п.г.;  $\delta$  – величина, що враховує втрати термомеханічної ексергії в паливній системі;  $\sum_{i=1}^n N_i^{\text{Ел}}$  – витрати електроенергії;  $E_Q^{\text{ПГ}}$  – витрати ексергії теплоти;

– ексергетичний ККД агрегату

$$\eta_{\text{ex}}^{\text{ТКА}} = [\lambda_I^{\text{ГТП}} \cdot \eta_{\text{ex}}^{\text{ГТП}} + (1 - \lambda_I^{\text{ТКА}} - \lambda_I^{\text{ГТП}})] \cdot (\lambda_{\text{II}}^{\text{ВК}} \cdot \eta_{\text{ex}}^{\text{ВК}} + \lambda_{\text{II}}^{\text{УТВГ}} \cdot \eta_{\text{ex}}^{\text{УТВГ}} + \lambda_{\text{II}}^{\text{ЕГ}} \cdot \eta_{\text{ex}}^{\text{ЕГ}} + \lambda_{\text{II}}^{\text{СП}}), \quad (8)$$

де  $\eta_{ex}^{ГТП}$ ,  $\eta_{ex}^{БК}$ ,  $\eta_{ex}^{УТВГ}$ ,  $\eta_{ex}^{ЕГ}$  – ексергетичні ККД ГТП, ВК, УТВГ, електрогенератора, відповідно;  $\lambda_I^{ТКА}$ ,  $\lambda_I^{ГТП}$ ,  $\lambda_{II}^{БК}$ ,  $\lambda_{II}^{УТВГ}$ ,  $\lambda_{II}^{ЕГ}$ ,  $\lambda_{II}^{СВ}$  – частки витрат ексергії в ТКА, ГТП, ВК, УТВГ, ЕГ і в ГТД.

Втрати ексергії в ТКА визначаються на основі залежності виду

$$\Delta E^{ТКА} = E_F^{ТКА} - E_P^{ТКА}, \quad (9)$$

де  $E_F^{ТКА}$  – потоки ексергії «палива» на вході в агрегат;  $E_P^{ТКА}$  – потік ексергії «продукту» на виході з агрегату.

Потік ексергії «палива» виражається залежністю

$$E_F^{ТКА} = E_{ПГ} + \Sigma E_E^{ГТП} + \Sigma E_E^{БК} + \Sigma E_E^{ТКА}, \quad (10)$$

де  $E_{ПГ}$  – сумарний потік ексергії на вході в дозатор п.г. ГТД;  $\Sigma E_E^{ГТП}$ ,  $\Sigma E_E^{БК}$ ,  $\Sigma E_E^{ТКА}$  – сума потоків ексергії електроспоживачів.

При відсутності утилізації теплоти в.г. і неврахуванні відборів стисненого повітря від ГТД потік ексергії «продукту» у ТКА визначається залежністю

$$E_P^{ТКА} = E_{КТ}^{вих} - E_{КТ}^{вх}. \quad (11)$$

Відносні втрати ексергії в ТКА

$$\delta E^{ТКА} = E^{ТКА} / E_F^{ТКА}. \quad (12)$$

Паливну ефективність агрегату можна оцінювати коефіцієнтом витрат п.г. ( $K_{ПГ}$ ) залежно від масової витрати газу в ВК із урахуванням впливу його напірної характеристики. Значення  $K_{ПГ}$  визначається залежністю

$$K_{ПГ} = G_{ПГ} / (G_{КТ} \cdot \psi_{П} / \psi_{П}^P) = G_{ПГ} / G_{КТ} \cdot \bar{\psi}_{П}, \quad (13)$$

де  $G_{ПГ}$  – витрата п.г., яка визначається з характеристики  $\eta_e = f(N_{СТ})$ ;  $G_{КТ}$  – витрата технологічного газу в ВК;  $\psi_{П}$  – коефіцієнт політропного напору ПЧ;  $\psi_{П}^P$  – коефіцієнт напору на розрахунковому режимі;  $\bar{\psi}_{П}$  – відносний коефіцієнт напору.

З використанням рівнянь (1) – (13), а також проектних і експериментальних даних виконується аналіз ефективності ТКА різного типу.

У **третьому розділі** розглянуто новий підхід до вибору спільних режимів роботи ВК і ГТП. Показано вплив геометричних і газодинамічних характеристик ВК на ступінь неузгодженості роботи системи «ГТП – ВК», у якості якої прийнята величина  $\varepsilon = \Delta G_{КТ} / (G_{КТ})_{пр}$ , де  $\Delta G_{КТ}$  – різниця величин  $G_{КТ}$  для проектного (поточного) і оптимального режимів роботи;  $(G_{КТ})_{пр}$  – масова витрата газу ВК (агрегата) на проектному (поточному) режимах.

Спосіб узгодження роботи ГТП і ВК, який застосовується в даний час, зводиться до уточнення їх балансів  $N_{КТ,СТ,ВК}$ ,  $n_p$ , а також інших показників у діапазоні  $n_p = (0,7 - 1,05)n_{ном}$ . Недоліками такого підходу є те, що не враховується взаємозв'язок між показниками ефективності ГТД і ВК та показником інтегральної ефективності ТКА. Новий підхід до вибору спільних режимів роботи ГТД і ВК полягає в досягненні максимальної енергетичної ефективності агрегату, виходячи з необхідності узгодження проектного (оптимального) режиму роботи ЦК і максимального ексергетичного ККД ТКА. Це забезпечує досягнення  $(\eta_{ex}^{ТКА})_{max}$  і, відповідно,  $(K_{ПГ})_{min}$ .

Досліджено вплив напору і геометрії ПЧ компресорів агрегатів типу ГПА-Ц-16С і ГПА-Ц-32С на узгодженість режимів роботи ГТП і ВК.

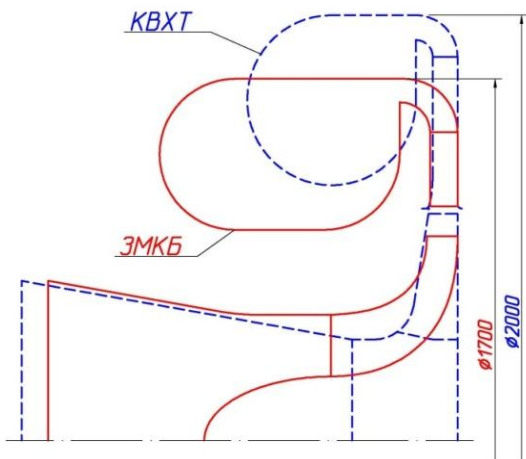


Рис. 4. ПЧ розробки: кафедри КВХТ С.-ПбГПУ і ДП «Івченко-Прогрес»

У зв'язку з цим напорна характеристика ПЧ компресора потужністю 32 МВт уточнювалася з використанням комплексу ANSYS CFX (ліцензійний договір №304706). Аналіз показав, що застосування ПЧ із РК, що мають кут виходу лопаток  $\beta_{Л_2} < 30^\circ$  і лопатковий (ЛД) або безлопатковий дифузор (БЛД), а також РК із  $\beta_{Л_2} = 32^\circ$  і БЛД (рис. 4) забезпечує співпадіння  $(\eta_{ex}^{BK})_{max}$  і  $(\eta_{ex}^{TKA})_{max}$  також як і  $(\eta_{\Pi})_{max}$  і  $(\eta_{\Sigma}^{TKA})_{max}$  (рис. 5).

Застосування РК із  $\beta_{Л_2} > 32^\circ$ , ЛД і БЛД приводить до неузгодженості системної характеристики ТКА і проектної характеристики ВК (рис. 5). При аналізі обмеження по помпажу на лівій вітці ГДХ умовно не враховується. Аналіз особливостей компресорів потужністю 32 МВт із ПЧ різного типу показав, що застосування високонапірної ПЧ зменшує радіальні розміри ВК, але вимагає регулювання характеристик як компресора, так і ГТД.

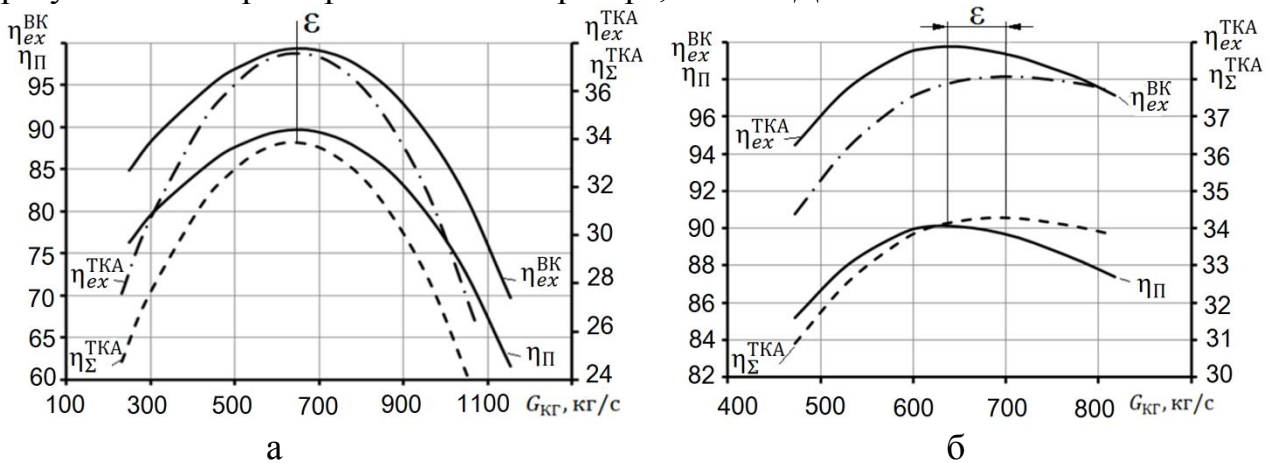


Рис. 5. ККД компресора і агрегата типу ГПА-Ц-32С: а – ВК із ПЧ, укомплектованої РК із  $\beta_{Л_2} = 32^\circ$  і БЛД; б – ВК з ПЧ конструкції ДП «Івченко-Прогрес», укомплектованої РК із  $\beta_{Л_2} = 52^\circ$  і ЛД

У **четвертому розділі** представлені результати оцінки ефективності агрегата ГПА-Ц-6,3А/56-1,45 для ЛКС, отримані на основі аналізу системних характеристик з використанням розрахункових і експериментальних даних, а також ЕТС агрегатів типу ТКА-Ц-6,3А з одно-, двокаскадним ВК. При аналізі ефективності ТКА для ЛКС використані результати випробувань ГТД Д-336-1 у ДП «Івченко-Прогрес»; компресора НЦВ-6,3/56-1,45, ГТП і ТКА в СМНВО на стенді замкнутого контуру (ЗК). Це дозволило виконати верифікацію

розрахункової моделі робочого процесу ТКА. При випробуваннях на стенді ЗК для виміру тисків застосовувалися прилади класу точності не вище 0,4, похибка визначення температур становила  $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$ , а частоти обертання роторів ВК і ГТД – не перевищувала 1 %. Середньоквадратична похибка визначення параметрів для номінального режиму роботи ВК не перевищувала для політропного КПД ( $\sigma\eta_{\text{п}}$ ) і політропного напору ( $\sigma\psi_{\text{п}}$ )  $\pm(1,5 - 2,5) \%$ , об'ємної витрати  $\sigma V = \pm(2 - 3,5) \%$ , потужності ВК  $\sigma N = \pm(2 - 2,5) \%$ . Результати порівняльного аналізу ефективності робочого процесу агрегату ГПА-Ц-6,3А/56-1,45 з використанням системної характеристики і його основних функціональних елементів (ССК, ВК) наведені на рис. 6.

При проектному режимі роботи втрати ексергії в ССК складають 715 кВт ( $\delta E_D = 3,44 \%$ ) і 550 кВт ( $\delta E_D = 2,81 \%$ ), а ексергетичні ККД 89,3 і 91,0 % при  $G_{\text{КТ}} = 95 \text{ кг/с}$  (точка А, рис. 6) для розрахункової і експериментальної характеристик, відповідно. Розходження в значеннях ККД становить 1,9 % (відносних), що свідчить про задовільне співпадіння розрахункових і експериментальних даних. Оптимальним значенням  $(\eta_{\text{ex}}^{\text{ССК}})_{\text{max}}$  відповідає точка В (рис. 6). Наявність неузгодженості між т. А і В є наслідком недоліку методу моделювання, що використовується при проектуванні компресора.

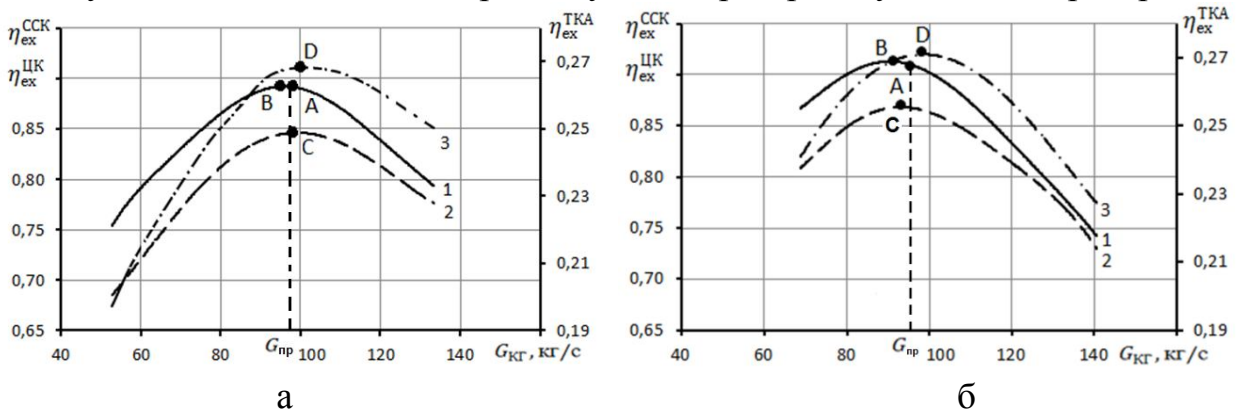


Рис. 6. Залежність системної характеристики ТКА, отриманої на основі:  
а – розрахункових ГДХ секції стиснення і ГТП; б – експериментальних ГДХ секції стиснення і ГТП: 1 – ексергетичний ККД ССК; 2 – ексергетичний ККД ВК; 3 – ексергетичний ККД ТКА

Як видно з рис. 6, при значенні ККД в оптимумі  $(\eta_{\text{ex}}^{\text{ССК}})_{\text{max}} = 89,4 \%$  (точка В) значення ККД для ВК менше на 4,5 % і становить  $\eta_{\text{ex}}^{\text{ВК}} = 84,9 \%$  (точка С), що обумовлено збільшенням втрат ексергії (до 1010 кВт). Оптимум  $\eta_{\text{ex}}^{\text{ВК}}$  (точка С) зміщується в область більших витрат щодо максимального ККД ССК (точка В) на величину  $\Delta G_{\text{КТ}} = 97 - 95 = 2 \text{ кг/с}$  (2,1 %). Зміна системної характеристики ВК обумовлено перерозподілом впливу складових у потоках ексергії: «термічної» і «механічної» складових при різних режимах роботи та особливостями ГДХ секції стиснення.

При аналізі інтегральної характеристики ТКА виявляється переважний вплив ГТП на величину ККД агрегату при різних режимах роботи й на зміну характеру залежності  $\eta_{\text{ex}}^{\text{ТКА}} = f(G_{\text{КТ}})$ . При цьому розрахункова системна характеристика ТКА має чітко виражений максимум при  $G_{\text{КТ}} = 100 \text{ кг/с}$  (точка D,



рис. 6, а), коли  $\eta_{ex}^{TKA}=26,8\%$ . Неузгодженість між  $(\eta_{ex}^{TKA})_{max}$  і  $(\eta_{ex}^{BK})_{max}$  (точка В, рис. 6, а) по масовій продуктивності становить  $3,0\%$ , а за значенням потужності  $1,1\%$ . Неузгодженість між проектним режимом роботи компресора (точка А, рис. 6, а) і максимумом характеристики  $\eta_{ex}^{TKA} = f(G_{KG})$  (точка D, рис. 6, а) по  $\Delta G_{KG}=100-95=5$  кг/с ( $5,0\%$ ), а по  $\Delta N_{СП}=2,0\%$ . Даний результат є наслідком застосування у складі ПЧ компресора РК з вихідними кутами  $\beta_{L_2} = 32^\circ$  і ЛД.

При використанні експериментальних ГДХ секції стиснення (рис. 6, б) спостерігається аналогічний характер розташування кривих ефективності ССК, ВК і ТКА.

Системні характеристики агрегату типу ГПА-Ц-6,3А, отримані на основі функціонального і функціонально-ексергетичного підходів з використанням розрахункових і експериментальних даних ССК і ГТП, представлені на рис. 7. Там же представлені дані про паливну ефективність агрегату, тобто залежності  $K_{ПГ} = f(G_{KG})$ .

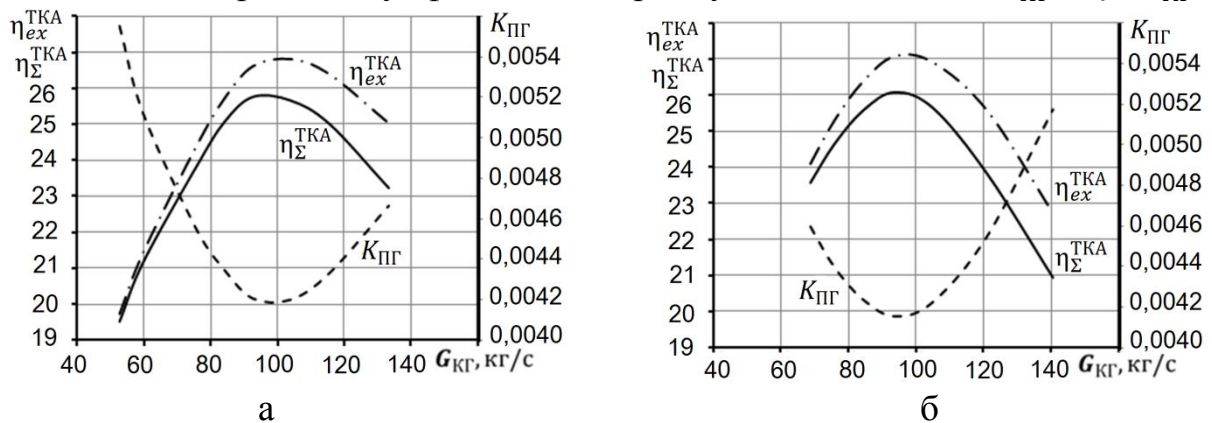


Рис. 7. Системні характеристики агрегату типу ГПА-Ц-6,3А, отримані на основі функціонального і функціонально-ексергетичного підходів, і характеристики паливної ефективності: а – розрахункові характеристики; б – експериментальні характеристики

Як видно із рис. 7, системні характеристики, отримані на основі функціонального і функціонально-ексергетичного підходів, істотно відрізняються. Значення  $\eta_{ex}^{TKA} > \eta_{ex}^{TKA}$  при всіх  $G_{KG}$ . Це пов'язане з природою ексергетичного ККД. При цьому  $(\eta_{ex}^{TKA})_{max}=25,8\%$ , що на  $3,4\%$  менше ніж  $(\eta_{ex}^{TKA})_{max}$ . Із рисунка також видно, що інтегральний критерій паливної ефективності має яскраво виражений оптимум по  $(K_{ПГ})_{min}$ . Таким чином, при різних ГДХ ССК спостерігається певна розбіжність оптимальних режимів роботи ССК, ВК і ТКА по  $G_{KG}$  і  $N_{СП}$ . Для розрахункових характеристик неузгодженість між проектним режимом компресора і режимом роботи агрегату при  $(\eta_{ex}^{TKA})_{max}$  становить  $5,0$  і  $2,0\%$  по величині  $\Delta G_{KG}$  і  $\Delta N_{СП}$ , відповідно, а для експериментальних даних ці показники рівні  $3,1$  і  $1,6\%$ .

Можливі способи керування системною характеристикою з метою досягнення оптимального режиму роботи агрегата а, отже, повної узгодженості в роботі ГТД і ВК пов'язані з необхідністю застосування засобів механізації ПЧ як у складі ВК, так і в складі ГГ і СТ двигуна. Зокрема, для впливу на системну характеристику



$f(G_{KT})$  має максимум (точка D) при значенні  $\eta_{ex}^{TKA}=16,39\%$  (рис. 10), рівень значень якого визначається величинами  $\eta_{ex}^{ГТП}$  і  $\eta_{ex}^{BK}$  для цього режиму роботи.

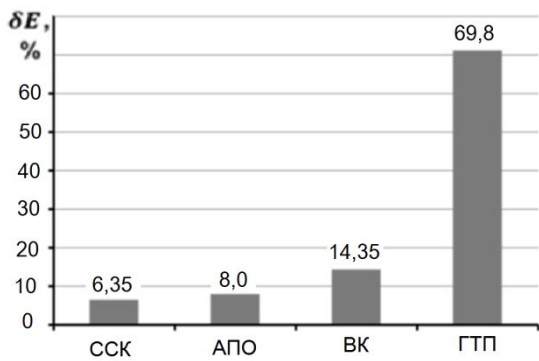


Рис. 9. Відносні втрати ексергії в елементах ТКА з компресором однокаскадного стиснення

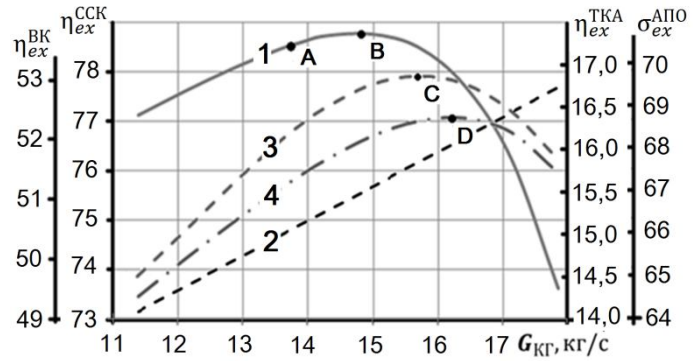


Рис. 10. Ефективність ТКА і його елементів: 1 –ККД ССК; 2 – коефіцієнт перетворення ексергії в АПО; 3 – ККД ВК; 4 –ККД ТКА

Аналіз втрат ексергії в елементах двокаскадного ВК (рис. 11) показав, що в першому каскаді  $\delta E=6,65\%$ , в другому каскаді  $\delta E=5,21\%$ . Сумарне значення втрат в двокаскадному ВК складає  $11,86\%$ . Із аналізу втрат ексергії в елементах одно- і двокаскадного ВК видно, що чим нижче рівень термічної складової потоку ексергії в ССК, тим менші втрати ексергії в КСК. Як видно з рисунка, ефективність ССК-1 характеризується більш високим значенням  $\eta_{ex}^{ССК-1}$  (рис. 11, а, крива 1,  $\eta_{ex}^{ССК-1}=75,8\%$ ) у порівнянні зі ССК-2 (рис. 11, а, крива 4,  $\eta_{ex}^{ССК-2}=75,5\%$ ).

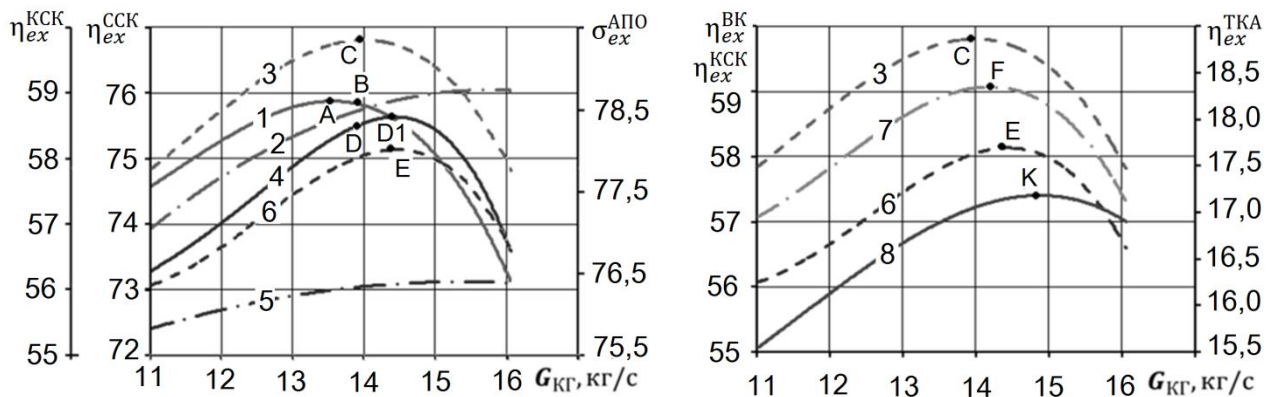


Рис. 11. Ефективність ТКА із двокаскадним ВК: 1 –ККД ССК-1; 2 – коефіцієнт перетворення ексергії в АПО-1; 3 –ККД КСК-1; 4 – ККД ССК-2; 5 – коефіцієнт перетворення ексергії в АПО-2; 6 –ККД КСК-2; 7 –ККД ВК; 8 –ККД ТКА

Рівень ККД двокаскадного ВК становить  $(\eta_{ex}^{ССК-1})_{max}=59,03\%$ , а величина відносних втрат ексергії на цьому режимі  $11,86\%$ . Як видно із рис. 11, значення  $(\eta_{ex}^{BK})_{max}$  ВК (точка F) займає проміжне положення як по масовій витраті, так і по ККД між максимальними значеннями ККД (точки С і Е). Застосування двокаскадного ВК дозволяє істотно зменшити термічну складову потоку ексергії в ССК-1 за рахунок зменшення температури газу при меншому  $\pi_K$  і знизити втрати ексергії в ССК-2 і АПО-2. Сумарні втрати ексергії в ВК зменшуються з 2600 до 1960 кВт, а втрати в ТКА з 15300 до 13700 кВт. Тим



самим підвищується ексергетичний ККД агрегату з 15,72 до 17,02 % і забезпечується зниження  $N_{\Pi}$  на 725 кВт на проектному режимі, що дає економити до 1 млн.  $\text{нм}^3/\text{рік}$  п.г.

У **п'ятому розділі** розглянуто вплив кліматичних умов експлуатації на ефективність роботи агрегату ГПА-Ц-6,3А/56-1,45, а також виконано аналіз ефективності різних модифікацій агрегатів типу ГПА-Ц. Зокрема виконано аналіз впливу температури та циклового повітря (ц.п.) на показники ефективності ВК, ГТП і агрегату (рис. 12, 13).

Слід зазначити, що питання впливу  $T_a$  на ефективність роботи агрегату і ВК розглянуто уперше і вимагає подальшого дослідження.

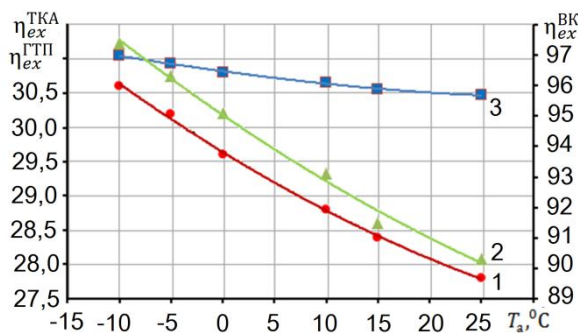


Рис. 12. Вплив температури навколишнього середовища на ефективність агрегату ГПА-Ц-6,3А/56-1,45 і його систем: 1 –  $(\eta_{ex}^{ТКА})_{max} = f(T_a)$ ; 2 –  $(\eta_{ex}^{ВК})_{max} = f(T_a)$ ; 3 –  $\eta_{ex}^{ГТП} = f(T_a)$

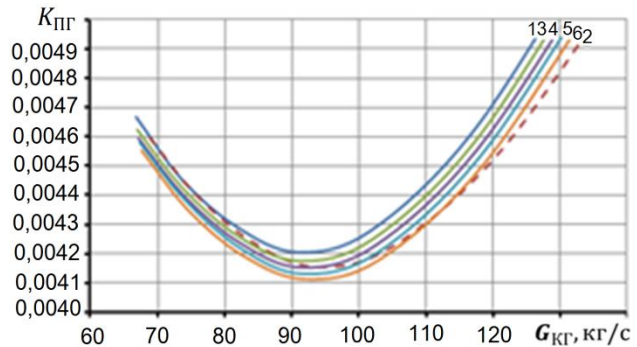


Рис. 13. Паливна ефективність агрегату типу ГПА-Ц-6,3А при різних  $T_a$ : 1 –  $T_a = 298 \text{ К}$  ( $+25 ^\circ\text{C}$ ); 2 –  $T_a = 288 \text{ К}$  ( $+15 ^\circ\text{C}$ ); 3 –  $T_a = 283 \text{ К}$  ( $+10 ^\circ\text{C}$ ); 4 –  $T_a = 273 \text{ К}$  ( $0 ^\circ\text{C}$ ); 5 –  $T_a = 268 \text{ К}$  ( $-5 ^\circ\text{C}$ ); 6 –  $T_a = 263 \text{ К}$  ( $-10 ^\circ\text{C}$ ).

Значення  $\eta_{ex}^{ВК}$  істотно залежить від зміни  $T_a$ , знижуються при її підвищенні з урахуванням впливу температури ґрунту, що оточує МГ. При  $T_a = -10 ^\circ\text{C}$  ( $T_{кг}=294,9 \text{ К}$ )  $(\eta_{ex}^{ВК})_{max}=97,4 \%$ ; при  $T_a = +25 ^\circ\text{C}$  ( $T_{кг}=299,4 \text{ К}$ )  $(\eta_{ex}^{ВК})_{max}=90,3 \%$ . Спільний вплив ГТП і ВК проявляється в помітному зниженні  $(\eta_{ex}^{ТКА})_{max}$  (с 30,6 до 27,8 %) і збільшенні коефіцієнта  $K_{ПГ}$  при підвищенні  $T_a$  (рис. 13). Як видно з рисунка, залежність  $K_{ПГ} = f(G_{КГ})$  має яскраво виражені екстремуми, які відповідають  $(K_{ПГ})_{min}$ , при деякому зміщенні точок оптимуму зі збільшенням  $G_{КГ}$ . Із зниженням  $T_a$  з 298 до 288 К витрата п.г. знижується на 0,7 %, що відповідає зменшенню витрати п.г. з 2100  $\text{м}^3/\text{год}$  ( $T_a=298 \text{ К}$ ) до 2090  $\text{м}^3/\text{год}$  ( $T_a=288 \text{ К}$ ) або 80 тис.  $\text{нм}^3$  за рік експлуатації агрегату. Таким чином, при створенні ТКА для експлуатації в умовах підвищених температур доцільно оснащення ТКА спеціальною системою охолодження ц.п.

Основні результати аналізу ефективності агрегатів типу ГПА-Ц потужністю 6,3 – 32 МВт у широкому діапазоні робочих параметрів ( $\pi_K=1,35 - 1,45$ ;  $G_{КГ}=95 - 650 \text{ кг/с}$ ;  $P_K=5,45 - 10 \text{ МПа}$ ) представлені на рис. 14.

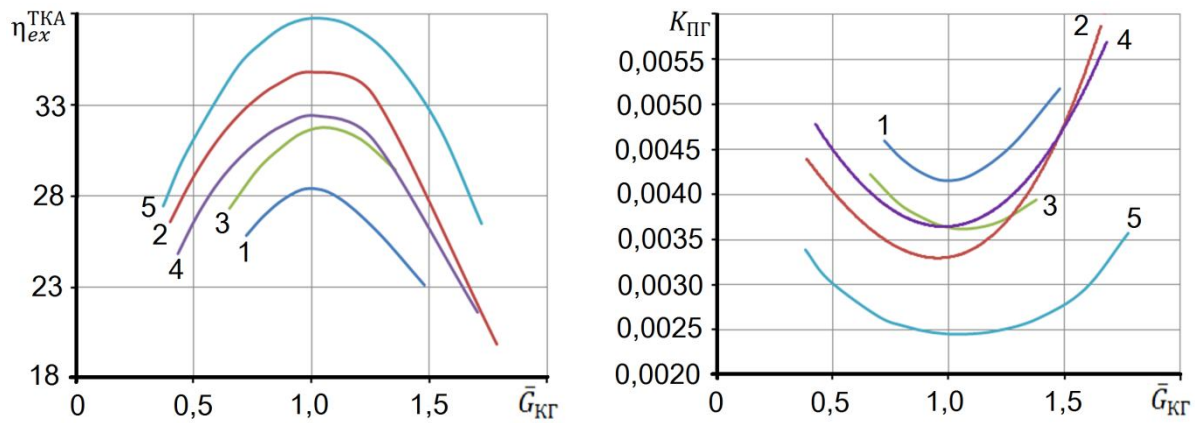


Рис. 14. Ефективність роботи агрегатів різного типу: 1– ГПА-Ц-6,3А/56-1,45; 2– ГПА-Ц-12/76-1,5; 3– ГПА-Ц-163/76-1,44; 4– ГПА-Ц-25СД/100-1,44М; 5– ГПА-Ц-323/76-1,35

Значення  $(\eta_{ex}^{TKA})_{max}$  агрегатів змінюється в межах 28,4 – 37,5 % для агрегатів типу ГПА-Ц-6,3А і ГПА-Ц-32, відповідно. Як видно з рис. 14, зі збільшенням потужності привода, підвищується  $\eta_{ex}^{TKA}$ , що відповідає особливостям зміни характеристики  $\eta_e = f(N_{CT})$  для ГТП. Виключення становить агрегат ГПА-Ц-12А/76-1,5. Ефективність даного типу агрегату може бути вище, ніж агрегатів із двигунами 16 і 25 МВт при значеннях  $(\eta_{ex}^{BK})_{max} = 94,5 - 97,8$  % на проектному режимі. Це підтверджує перспективність створення двигуна АІ-312 конструкції ДП «Івченко-Прогрес» для ТКА п.г. і доцільність його застосування при реконструкції ГТС України. Аналіз показників паливної ефективності агрегатів типу ГПА-Ц показує (рис. 14), що найменш ефективним є агрегат ГПА-Ц-6,3А/56-1,45, що має значення  $(K_{ПГ})_{min} = 0,00415$ , а найбільш ефективним ГПА-Ц-32С/76-1,35 при  $(K_{ПГ})_{min} = 0,00245$ .

При розробці нового обладнання поряд з термодинамічним аналізом доцільно використання техніко-економічних показників, зокрема, вартості життєвого циклу (ВЖЦ). Термодинамічний аналіз ефективності агрегату ТКА-Ц-6,3А/77-4,37 показав, що застосування двокаскадної схеми ВК дозволяє підвищити  $\eta_{ex}^{TKA}$  на 4,6 % (відносних), зменшити потужність, що споживається на 725 кВт і знизити витрата п.г. на 122,4 кг/год. Однак реалізація двокаскадної схеми підвищує вартість агрегату. Для визначення найбільш доцільної схеми ТКА і аналізу впливу різних факторів виконано розрахунок ВЖЦ варіантів ЕТС із урахуванням капітальних і експлуатаційних витрат. Основною складовою експлуатаційних витрат газотурбінного ТКА є вартість п.г. При ціні п.г. в 150 \$/тис.м<sup>3</sup> і нижче ВЖЦ агрегата з однокаскадним ВК буде нижча, ніж з двокаскадним ВК. При ціні п.г. в 300 \$/тис.м<sup>3</sup> робота агрегатів буде рівноеконічна, а при підвищенні ціни п.г. вище 300 \$/тис.м<sup>3</sup> доцільне використання ТКА із двокаскадним ВК.

Застосування результатів термодинамічного аналізу і оцінки ВЖЦ агрегату надає інформацію для вибору ЕТС і його компоновальної схеми, можливих напрямків удосконалення процесу НДР і ДКР, а також конструкції на передпроектній стадії робіт по його створенню.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розглянуті і вирішені науково-практичні завдання, що стосуються створення блоково-комплектних ТКА п.г., удосконалення методики системного аналізу їхньої ефективності, вибору спільних режимів роботи ГТП і ВК, а також удосконалення процесу проектування агрегатів.

Основні результати дисертаційної роботи полягають у наступному:

1. Отримала подальший розвиток методика ексергетичного аналізу ефективності ТКА п.г. Вперше агрегат розглянуто, як складну енерготехнологічну систему, враховано вплив основних і допоміжних систем ВК і ГТД на ефективність агрегата, а його системна характеристика при термодинамічному аналізі ТКА одержана з використанням функціонального і функціонально-ексергетичного підходів для визначення інтегрального ККД агрегата.

2. Установлено, що значення ексергетичного ККД агрегата, як інтегрального показника його ефективності, при використанні функціонально-ексергетичного підходу змінюється на розрахунковому режимі роботи в межах 28,4 – 37,5 %, а вплив допоміжних систем проявляється в зниженні цих значень на 2,5 – 1,2 % (відносних) для агрегатів потужністю 6,3 – 32 МВт, відповідно. Розходження в значеннях інтегральних ККД агрегатів, отриманих на основі функціонального і функціонально-ексергетичного підходів, становить на розрахунковому режимі 3,7 – 10 % (відносних) для агрегатів різної потужності.

3. На основі аналізу енерготехнологічних схем агрегатів отримано уточнені аналітичні залежності для визначення ексергетичних ККД основних енергосистем, як показників їхньої термодинамічної досконалості.

4. Уперше з використанням експериментальних даних, отриманих у процесі натурних випробувань агрегата ГПА-Ц-6,3А/56-1,45, виконано верифікацію розрахункової моделі робочого процесу блоково-комплектного ТКА з однокорпусним ВК типу НЦВ-6,3 і ГТД Д-336-1/2 потужністю 6,3 МВт.

5. Запропоновано новий критерій оцінки інтегральної ефективності ТКА у вигляді коефіцієнта витрати п.г., що враховує особливості газодинамічних характеристик ВК і їхній вплив на інтегральні показники ефективності робочого процесу ТКА. Встановлено, що найменш ефективним є агрегат типу ГПА-Ц-6,3А потужністю 6,3 МВт, а найбільш ефективним є агрегат типу ГПА-Ц-32 потужністю 32 МВт, які мають значення коефіцієнтів витрати п.г. 0,00415 і 0,00245, відповідно.

6. Виявлено вплив особливостей газодинамічних характеристик ВК, обумовлених геометрією проточної частини і режимом його роботи, на ефективність ТКА. Для досягнення оптимального режиму роботи агрегата при незмінній конструкції ГТД доцільне застосування низьконапірних і середньонапірних РК у ступенях ВК ( $\beta_{Л_2} < 32^0$ ) у поєднанні із ЛД і БЛД. Застосування високонапірних РК ( $\beta_{Л_2} > 32^0$ ) приводить до неузгодженості системної характеристики ТКА і проектної характеристики ВК по  $G_{КГ}$  і чим вище напірність ступеня, тим більша величина неузгодженості, що знижує економічність роботи агрегата.

7. Обґрунтовано методичні підходи до вибору найбільш доцільної ЕТС дотискувального ТКА типу ТКА-Ц-6,3А з двигуном Д-336-1/2 потужністю 6,3 МВт на основі використання інтегрального ККД, а також з використанням техніко-економічних показників (вартість його життєвого циклу). Показано, що застосування агрегату із двокаскадним ВК дозволяє підвищити ККД агрегата на 7,6 % (відносних), знизити споживання потужності на 725 кВт, що забезпечує економію п.г. до 1 млн.  $\text{нм}^3/\text{рік}$ . Аналіз вартості життєвого циклу агрегата показав, що при ціні п.г. в 150 \$/тис.  $\text{м}^3$  і нижче доцільним є застосування ЕТС агрегата з однокаскадним стисненням п.г., а при ціні вище 300 \$/тис.  $\text{м}^3$  – із двокаскадним стисненням.

8. Отримано дані про доцільність підвищення ККД і паливної ефективності агрегатів типу ГПА-Ц-6,3А при їхній експлуатації в умовах підвищених температур навколишнього середовища за рахунок застосування відомих способів охолодження циклового повітря приводного ГТД. Для агрегата типу ГПА-Ц-6,3А охолодження ц.п. з  $+25^\circ\text{C}$  до  $+15^\circ\text{C}$  забезпечує економію п.г. до 80 тис.  $\text{нм}^3/\text{рік}$  при експлуатації ТКА.

9. Сформульовані рекомендації з удосконалення процесу проектування газотурбінних агрегатів, призначених для експлуатації у складі КС магістральних газопроводів.

10. Матеріали, представлені в дисертаційній роботі, використовуються в СМНВО при проектуванні турбокомпресорних агрегатів. Результати дисертаційної роботи використовуються в навчальному процесі кафедри технічної теплофізики Сумського державного університету.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Влияние характеристик центробежного компрессора на эффективность ГПА с газотурбинным приводом судового типа / Парафейник В. П., Нефедов А. Н., Тертышный И. Н., Чобенко В. Н., Лютиков А. Л. // Авиационно-космическая техника и технология. Харьков: ХАИ, 2010. №8. С. 60–67.

2. К вопросу оптимизации геометрии проточной части центробежных компрессоров природного газа / Парафейник В. П., Нефедов А. Н., Евдокимов В. Е., Тертышный И. Н. // Компрессорная техника и пневматика. 2012. №2. С. 10–17.

3. Мирошниченко А. А., Тертышный И. Н., Костенко Д. А. Сравнительный анализ энергетической эффективности новых газоперекачивающих агрегатов с приводом различного типа в условиях КС «Бердичев» // Компрессорное и энергетическое машиностроение. 2012. №4. С. 6–9.

4. Анализ эффективности центробежного компрессора как сложной энерготехнологической системы / Тертышный И. Н., Парафейник В. П., Нефедов А. Н., Рогальский С. А. // Компрессорное и энергетическое машиностроение. 2014. №4. С. 6–10.

5. Вопросы термодинамического анализа эффективности рабочего процесса дожимных газоперекачивающих агрегатов с газотурбинным

приводом. Часть I / Тертышный И. Н., Прилипко С. А., Мирошниченко Е. А., Парафейник В. П. // Проблемы машиностроения. 2015. Т.18, №4/1. С. 9–17.

6. Тертышный И. Н., Прилипко С. А., Парафейник В. П. Вопросы термодинамического анализа эффективности рабочего процесса дожимных газоперекачивающих агрегатов с газотурбинным приводом. Часть II // Проблемы машиностроения. 2016. Т. 19, №2. С. 10–18.

7. Выбор системной характеристики турбокомпрессорного агрегата на основе анализа его эффективности по результатам натурных испытаний. Часть I. Состояние вопроса и объекты исследования / Парафейник В. П., Щербаков Н. С., Шевчук В. В., Разношинский В. Н., Тертышный И. Н., Прилипко С. А. // Проблемы машиностроения. 2016. Т. 19, №4. С. 12–18.

8. Выбор системной характеристики турбокомпрессорного агрегата на основе анализа его эффективности по результатам натурных испытаний. Ч. II. Методологические подходы к созданию блочно-комплектных турбокомпрессорных агрегатов для компрессорных станций газовой промышленности / Парафейник В. П., Щербаков Н. С., Рябов А. А., Шевчук В. В., Разношинский В. Н., Тертышный И. Н., Прилипко С. А. // Проблемы машиностроения. 2017. Т. 20, №1. С. 3–11.

9. Выбор системной характеристики турбокомпрессорного агрегата на основе анализа его эффективности по результатам натурных испытаний. Ч. III. Исследование эффективности основных систем турбокомпрессорного агрегата ГПА-Ц-6,3А/56-1,45 по результатам его натурных испытаний / Щербаков Н. С., Парафейник В. П., Рябов А. А., Шевчук В. В., Разношинский В. Н., Тертышный И. Н., Прилипко С. А. // Проблемы машиностроения. 2017. Т. 20, №2. С. 11–18.

10. Выбор системной характеристики турбокомпрессорного агрегата на основе анализа его эффективности по результатам натурных испытаний. Ч. IV. Анализ системной характеристики турбокомпрессорного агрегата типа ГПА-Ц-6,3А и возможность оптимизации режимов его работы на стадии проектирования / Парафейник В. П., Тертышный И. Н., Прилипко С. А., Рябов А. А. // Проблемы машиностроения. 2017. Т. 20, №4. С. 3–12.

11. Прилипко С. А., Тертышный И. Н., Парафейник В. П. О возможности совершенствования конструкции газотурбинной компрессорной установки на основе углубленного термодинамического анализа ее рабочего процесса // Промышленная теплотехника. 2017. Т. 39, №5. С. 54–61.

12. Парафейник В. П., Тертышный И. Н. Возможность совершенствования турбокомпрессорных агрегатов газовой промышленности по результатам анализа эффективности их рабочего процесса // Промышленная теплотехника. 2018. Т. 40, №1. С. 36–43.

13. Термодинамический анализ эффективности центробежного компрессора как сложной энерготехнологической системы в составе агрегата типа ГПА-Ц-32 / Тертышный И. Н., Парафейник В. П., Нефедов А. Н., Рогальский С. А., Котенко Н. А., Тимошадченко Д. Н., Михайленко С. А. // XVI МНТК по компрессоростроению: труды конференции. С.-Петербург: ЗАО «РЭП Холдинг», 2014. Т. 1. С. 328–339.

14. Методология проектирования блочно-комплектных турбокомпрессорных агрегатов и установок с газотурбинным приводом для компрессорных станций газовой и нефтяной промышленности / Парафейник В. П., Татаринев В. М., Прилипко С. А., Тертышный И. Н. // XVII МНТК по компрессорной технике: труды конференции. Казань: Изд-во «Слово», 2017. С. 151–157.

15. Анализ эффективности и выбор системной характеристики газоперекачивающего агрегата типа ГПА-Ц-6,3А на основе результатов натурных испытаний [электронный ресурс] / Парафейник В. П., Щербаков Н. С., Тертышный И. Н., Прилипко С. А., Рябов А. А., Шевчук В. В., Разношинский В. Н. // Удосконалювання енергоустановок методами математичного і фізичного моделювання: тези доповідей XVI МНТК. Харків: Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України. 2017. 1 електрон. опт. диск.

## АНОТАЦІЯ

**Тертишний І. М.** Удосконалення конструкції блоково-комплектних турбокомпресорних агрегатів з газотурбінним приводом для компресорних станцій магістральних газопроводів. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.16 «Турбомашини та турбоустановки». – Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного Національної академії наук України, Харків, 2018.

Дисертація присвячена удосконаленню науково-методичних основ системного аналізу ефективності робочого процесу блоково-комплектних турбокомпресорних агрегатів (ТКА) газової промисловості та розробки методичних підходів до оцінки ефективності енерготехнологічних схем (ЕТС) агрегатів з використанням методів ексергетичного аналізу, виявленню підходів до вибору спільних режимів роботи газотурбінного приводу (ГТП) і відцентрового компресора (ВК) з метою досягнення оптимальних режимів роботи агрегата.

На основі аналізу енерготехнологічних схем агрегатів отримані уточнені аналітичні залежності для визначення ексергетичних ККД основних енергосистем, як показників їхньої термодинамічної досконалості. Запропоновано новий критерій оцінки інтегральної ефективності ТКА у вигляді коефіцієнта витрати п.г., що враховує особливості газодинамічних характеристик ВК і їхній вплив на інтегральні показники ефективності робочого процесу ТКА. Визначено геометричні параметри робочого колеса проточної частини однокорпусного ВК, які впливають на системну характеристику ТКА, що дозволяє забезпечити задовільне узгодження характеристик ГТД і ВК у складі ТКА для ЛКС.

Обґрунтовано методику вибору найбільш доцільної ЕТС дотискувального ТКА на основі функціонально-ексергетичного підходу до оцінки ефективності робочого процесу агрегату і вартості життєвого циклу. Отримані результати



дозволили сформулювати рекомендації з удосконалення процесу проектування газотурбінних ТКА.

**Ключові слова:** турбокомпресорний агрегат, енерготехнологічна схема, відцентровий компресор, газотурбінний привод, термодинамічний аналіз, ексергетичний ККД, ексергетичні втрати, ефективність агрегата, життєвий цикл.

## АННОТАЦИЯ

**Тертышный И. Н.** Совершенствование конструкции блочно-комплектных турбокомпрессорных агрегатов с газотурбинным приводом для компрессорных станций магистральных газопроводов. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.05.16 «Турбомашины и турбоустановки». – Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного Национальной академии наук Украины, Харьков, 2018.

Диссертация посвящена совершенствованию научно-методических основ системного анализа эффективности рабочего процесса блочно-комплектных ТКА газовой промышленности и разработки методических подходов к оценке эффективности энерготехнологических схем агрегатов с использованием методов эксергетического анализа, определению подходов к выбору совместных режимов работы ГТП и ЦК с целью достижения оптимальных режимов работы агрегата.

На основе анализа энерготехнологических схем агрегатов получены уточненные аналитические зависимости для определения эксергетических КПД основных энергосистем, как показателей их термодинамического совершенства. Предложен новый критерий оценки интегральной эффективности ТКА в виде коэффициента расхода топливного газа, который учитывает особенности газодинамических характеристик ЦК и их влияние на интегральные показатели эффективности рабочего процесса ТКА. Определены геометрические параметры рабочего колеса проточной части однокорпусного ЦК, которые влияют на системную характеристику ТКА, что позволяет обеспечить удовлетворительное согласование характеристик ГТД и ЦК в составе ТКА для ЛКС.

Обосновано методику выбора наиболее целесообразной энерготехнологической схемы дожимного ТКА на основе функционально-эксергетического подхода к оценке эффективности рабочего процесса агрегата и стоимости жизненного цикла. Полученные результаты позволили сформулировать рекомендации по совершенствованию процесса проектирования газотурбинных ТКА.

**Ключевые слова:** турбокомпресорный агрегат, энерготехнологическая схема, центробежный компрессор, газотурбинный привод, термодинамический анализ, эксергетический КПД, эксергетические потери, эффективность агрегата, жизненные циклы.

## ABSTRACT

**Tertyshnyi I. M.** Improvement in design of modular packaged gas turbine driven turbo-compressor units for compressor stations of gas pipeline network. – A manuscript.

Thesis for the scientific degree of the Candidate of Technical Sciences by specialty 05.05.16 – Turbo-Machines and Turbine Installations. – A. Podgorny Institute of Mechanical Engineering Problems of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv, 2018.

The dissertation is devoted to the improvement in scientific and methodological foundations for system analysis of the efficiency of gas modular packaged turbo-compressor unit (TCU) operation and development of methodological approaches to evaluate the efficiency of the unit energotechnological scheme (ETS) using exergy analysis, determine approaches to selection of joint operating modes of a gas turbine drive (GTD) and a centrifugal compressor (CC) to achieve optimum operation of the unit.

On the basis of the analysis of the unit ETS, verified analytical dependencies to determine exergy efficiencies of the main power systems as indicators of their thermodynamic perfection have been obtained. Identified geometry parameters of impellers the rotor bundle of single-casing compressors, which influence for system curve of TCU and provides the most preferred coincidence of operation modes of GTD and CC in TCU for linear compressor stations.

Justified method to selecting the most preferred energotechnological system of the boost TKA based on the functional-exergy approach to evaluate the efficiency of unit operation and life cycle cost data. The obtained results allowed recommendations to improve the design process of gas-turbine units.

**Keywords:** turbo-compressor unit, energotechnological scheme, centrifugal compressor, gas-turbine drive, thermodynamic analysis, exergy efficiency, exergy losses, unit efficiency, life cycle.

Підписано до друку 10. 09. 2018 р.  
Формат 60х84/16. Ум. друк. арк. 1,1. Обл.-вид. арк. 0,9. Тираж 100 пр. Зам. №875.

Видавець і виготовлювач  
Сумський державний університет,  
вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, 40007  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК №3062 від 17.12.2007.