

УДК 621.578

М. І. РАДЧЕНКО, Д. В. КОНОВАЛОВ, Г. О. КОБАЛАВА

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Україна

АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОМІЖНОГО ОХОЛОДЖЕННЯ ПОВІТРЯ ГАЗОТУРБІННИХ УСТАНОВОК УПОРСКУВАННЯМ ВОДИ АЕРОТЕРМОПРЕСОРОМ

Проведено порівняльний аналіз існуючих схемних рішень газотурбінних установок простого і складного циклів з проміжним охолодженням повітря шляхом упорскування води та запропонованих схемних рішень із застосуванням аеротермопресора. Принцип охолодження з використанням ефекту аеротермопресії, або так званої термогазодинамічної компресії, полягає у підвищенні тиску газу (повітря) в процесі миттєвого випаровування води, упорскуваної в газовий (повітряний) потік, прискорений до швидкості, близької звуковій. В результаті розрахунків показано, що застосування аеротермопресора дозволяє підвищити ККД газотурбінних установок з регенерацією на 0,5...2,0 %, а установок складного циклу зі ступінчастими стисненням і розширенням – на 2,0...4,0 %.

Ключові слова: термогазодинамічна компресія, аеротермопресор, газотурбінна установка, упорскування води, компресор, робоче тіло.

1. Аналіз проблеми і постановка мети дослідження

Одним з ефективних способів підвищення потужності і ККД газотурбінних установок (ГТУ) є упорскування води в проточну частину компресора газотурбінного двигуна. Даний спосіб полягає в тому, що вода під високим тиском упорскується в ненасичений повітряний потік, в якому через різницю парціальних тисків водяної пари на поверхні крапель води і в повітряному потоці вона випаровується, відбираючи теплоту на випаровування від циклового повітря [1]. Вода, що упорскується, виконує дві функції – відбирає теплоту у охолоджуваного повітря і повертає її в цикл ГТУ у вигляді додаткового робочого тіла – пари. Для ГТУ великої потужності цей метод добре випробований і давно впроваджений в експлуатації на широкому ряді комерційних установок [2, 3]. Упорскування води здійснюється головним чином для збільшення потужності газотурбінного двигуна (режими форсування) і стабілізації потужності ГТУ при високих температурах навколишнього середовища [3].

Одним із способів покращення ефективності розпилення є використання перегрітої води, що при її упорскуванні на вході компресора газопаротурбінної установки (ГПТУ) дозволяє підвищити ККД установки на 1...2 % [1, 4].

Перспективним способом розпилення рідини є застосування термогазодинамічної компресії, що дозволяє поєднати два фізичні процеси – контактне охолодження повітря і підвищення тиску, які у свою

чергу забезпечують скорочення витрат потужності компресора [5]. Для здійснення таких процесів застосовують аеротермопресор [6, 7].

Термогазодинамічна компресія (термопресія) – це підвищення тиску газу в процесі миттєвого випаровування води, упорскуваної в газовий (повітряний) потік, прискорений до швидкості, близької звуковій [6]. При цьому на випаровування води відводиться теплота від газу (повітря), в результаті чого знижується його температура. Варто зазначити, що застосування термогазодинамічної компресії як засобу ефективного розпилення води, а також збільшення кількості робочого тіла в циклі ГТУ раніше не розглядалося.

Мета дослідження – проаналізувати доцільність проміжного упорскування води в циклове повітря аеротермопресором для підвищення ефективності ГТУ.

2. Результати дослідження

Одним із ефективних способів проміжного охолодження повітря є застосування аеротермопресора для упорскування води в потік циклового повітря при його стисненні в компресорі ГТУ. Особливості процесів, що мають місце в аеротермопресорі, наступні.

При русі двофазної суміші в секції випаровування термопресора можна виділити три характерні режими (рис. 1) [6, 7]. В області, що безпосередньо примикає до площини упорскування, має місце режим I, коли вплив лобового опору крапель рідини

переважає над всіма іншими діями і визначає поведінку потоку. При цьому відбувається збільшення числа Маха, статичний тиск потоку знижуються, а температура рідини підвищується, наближаючись до температури насичення. Велика швидкість газового потоку сприяє інтенсивному випаровуванню рідини. Аеродинамічний опір крапель на цій ділянці переважає над позитивним ефектом випаровування [6, 7]. Падіння тиску ΔP^I внаслідок аеродинамічного опору на режимі I може бути досить значним і складати 5...15 % [6, 7]. Поступово різниця в швидкості газу і рідини зменшується і вплив лобового опору крапель знижується. Підвищення температури рідини значно збільшує швидкість випаровування. Наступає момент, коли визначальним процесом є випаровування рідини – режим II. При цьому швидкість потоку і число Маха зменшуються, а повний і статичний тиск зростають (рис. 1). На цьому режимі позначається уповільнююча дія газу на рідину, оскільки в деякій області рідинна швидкість, більша, ніж швидкість газу. Це сприяє деякому підвищенню тиску, втраченому в режимі I. Маса рідини поступово зменшується внаслідок випаровування, звідси до потоку в режимі II повертається менше енергії, ніж витрачається в режимі I.

Поступово швидкість випаровування знижується внаслідок зменшення площі поверхні крапель і скорочується різниця в швидкості і температурі фаз. Поверхнєве тертя, що було до цього відносно незначним, стає переважаючим чинником – режим III. В дифузорі відбувається зниження швидкості парогазової суміші і підвищення статичного тиску.

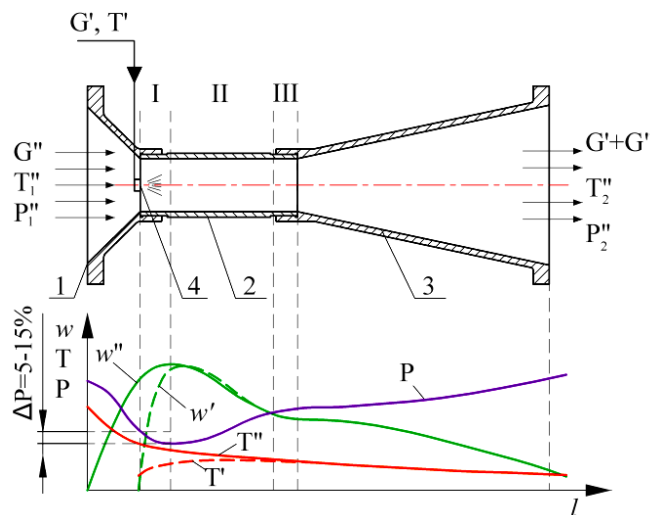


Рис. 1. Характер зміни параметрів в термопресорі: 1 – сопло; 2 – робоча камера; 3 – дифузор; 4 – форсунка; P – тиск; T , T'' – температура рідини і газу (повітря); w' , w'' – швидкість краплинної рідини і газу (повітря); G' , G'' – витрата рідини на уперскування і газу (повітря)

Для визначення ефективності проміжного охолодження повітря газотурбінних установок уперскуванням води аеротермопресором, у якості базових, взято наступні схеми ГТУ: схема 1 – проста схема ГТУ (рис. 2.); схема 2 – схема ГТУ з регенерацією теплоти (рис. 3); схема 3 – складна схема ГТУ із тріступінчастим стисненням повітря в компресорі та двоступінчастим розширенням газу в турбіні (рис. 4).

Введення води із застосуванням аеротермопресора в циклове повітря ГТУ можна запропонувати за наступними схемними рішеннями: схема 4 – аеротермопресор встановлено за регенератором теплоти (рис. 5); схема 5 – аеротермопресор встановлено між ступенями стиснення компресора (рис. 6).

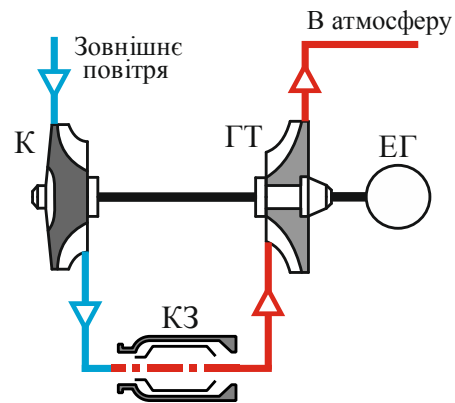


Рис. 2. Схема ГТУ (простий цикл): К – компресор; КЗ – камера згоряння; ГТ – газова турбіна; ЕГ – електрогенератор

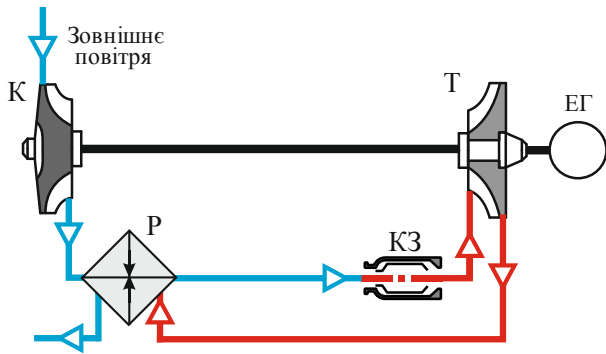


Рис. 3. Схема ГТУ із регенерацією теплоти:
 К – компресор; Т – турбіна; КЗ – камера згоряння;
 Р – регенеративний теплообмінник;
 ЦН – циркуляційний насос; ЕГ – електрогенератор

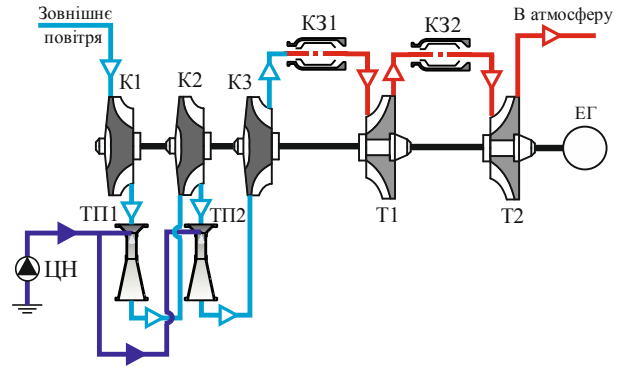


Рис. 6. Схема ступінчастої ГТУ із застосуванням аеротермокомпресора між ступенями компресора:
 К1, К2, К3 – компресори першого, другого і третього ступенів; Т1, Т2 – турбіни першого і другого ступенів; ТП1, ТП2 – аеротермокомпресори першого і другого ступенів;
 КЗ1, КЗ2 – камери згоряння першого і другого ступенів;
 ЕГ – електрогенератор

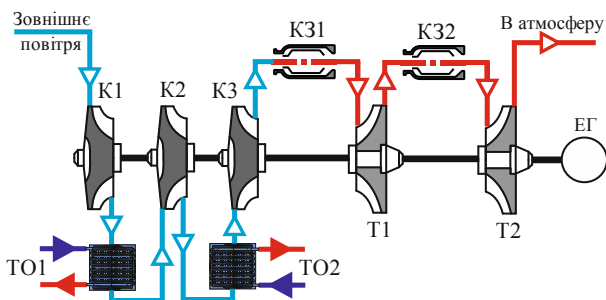


Рис. 4. Схема багатоступінчастої ГТУ:
 К1, К2, К3 – компресори першого, другого і третього ступенів; Т1, Т2 – турбіни першого і другого ступенів; ТО1, ТО2 – теплообмінники першого і другого ступенів; КЗ1, КЗ2 – камери згоряння першого і другого ступенів;
 ЕГ – електрогенератор

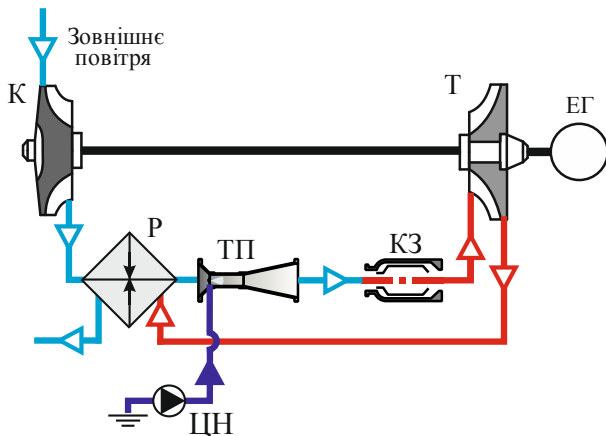


Рис. 5. Схема ГТУ з регенерацією теплоти й упорскуванням води аеротермокомпресором:
 К – компресор; Т – турбіна; ТП – аеротермокомпресор;
 КЗ – камера згоряння; Р – регенеративний теплообмінник; ЦН – циркуляційний насос;
 ЕГ – електрогенератор

При аналізі схемних рішень ГТУ приймалися наступні вхідні дані: діапазон температур зовнішнього повітря на вході – $t_{зп} = 15...50\text{ }^\circ\text{C}$; загальна ступінь підвищення тиску в компресорі – $\pi_k = 16,0$; температура продуктів згоряння палива на виході з камери згоряння – $t_3 = 1150\text{ }^\circ\text{C}$; паливо – природний газ ($Q_n^p = 50056\text{ кДж/кг}$); ступінь регенерації теплоти – $\sigma_{рег} = 0,9$.

В якості базової для розрахунків ГТУ прийнято мікротурбіну із номінальною потужністю $N_n = 100\text{ кВт}$. На сьогодні провідними виробниками мікротурбін є Alstom, General Electric, Kawasaki, MAN TURBO AG, Mitsubishi Heavy Industries, Rolls-Royce, SIEMENS, Solar Turbines, Turbomach, Capstone-Calnetix та інші.

Результати розрахунків наведених схемних рішень показали, що зниження температури повітря за регенеративним теплообмінником (рис. 5) в результаті випарного охолодження в аеротермокомпресорі становить $170...175\text{ }^\circ\text{C}$ (рис. 7), що забезпечує підвищення тиску повітря на величину $\Delta P_{тп(4)} = 1,18...1,21$. Кількість води, що упорскується, становить $3...5\%$ від витрати повітря через компресор. Підвищення тиску в аеротермокомпресорі забезпечує зменшення роботи на стиснення в компресорі, а додаткова кількість води, що упорскується, дозволяє отримати більшу потужність турбіни. Застосування цієї схеми дозволяє підвищити ККД ГТУ з регенерацією теплоти на величину $\Delta \eta_e = 0,5...2,0\%$ в залежності від температури зовнішнього повітря (рис. 8), а зменшення питомої витрати палива при цьому становить $\Delta b_e = 4...10\text{ г/(кВт}\cdot\text{год)}$.

Зниження температури повітря між ступенями компресора (схема 5) в результаті випарного охолодження в аеротермокомпресорі становить 60...110 °С (рис. 7), що забезпечує підвищення тиску повітря на величину $\Delta P_{тп(5)} = 1,08...1,12$. Сумарна кількість води, що уприскується за першим і другим ступенями компресора становить 5...7 % від витрати повітря через компресор.

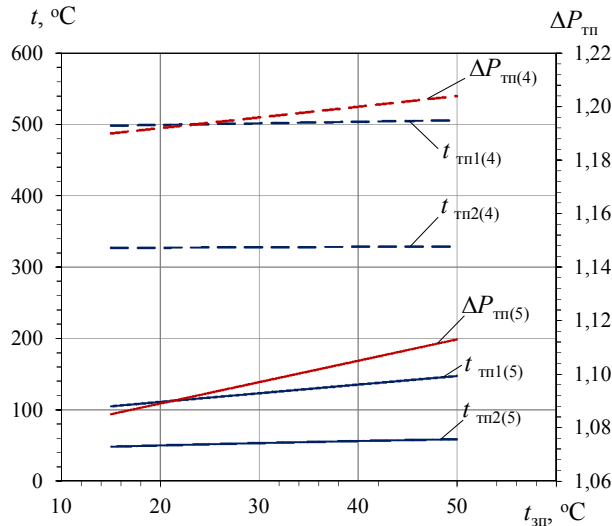


Рис. 7. Залежності температури до і після аеротермокомпресора $t_{тп1}$, $t_{тп2}$, а також ступеня підвищення тиску в аеротермокомпресорі $\Delta P_{тп}$ від температури зовнішнього повітря $t_{зп}$:
 - - - - - схема 4; _____ - схема 5;

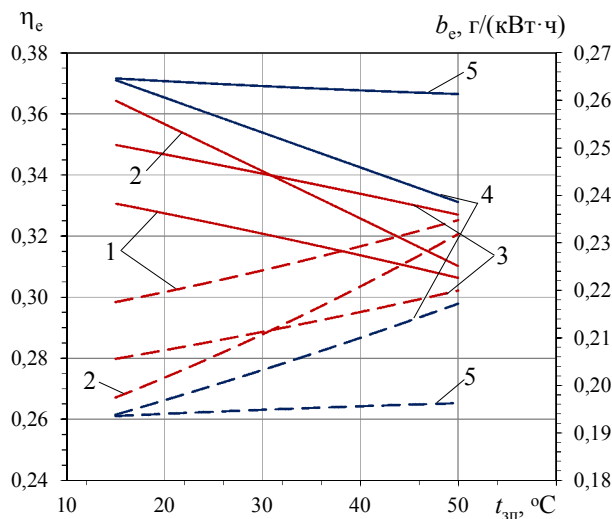


Рис. 8. Залежності коефіцієнта корисної дії ГТУ η_e і питомої витрати палива b_e від температури зовнішнього повітря $t_{зп}$:
 _____ - η_e ; - - - - - b_e ; 1 – схема 1; 2 – схема 2;
 3 – схема 3; 4 – схема 4; 5 – схема 5

Зменшення роботи на стиснення в компресорі та додаткова кількість води, що уприскується в схемі 5 дозволяє підвищити ККД ГТУ на $\Delta \eta_e = 2,0...4,0$ % (рис. 8), а зменшення питомої витрати палива при цьому становить $\Delta b_e = 10...20$ г/(кВт·год).

Аналізуючи схеми, наведені на рис. 2-6, можна зробити наступні висновки:

1. Уприскування води в повітря здійснюється в потік, що рухається зі швидкістю близько звукової, забезпечує більш ефективний розпил ніж уприскування традиційними способами (пневматичними або механічними форсунками);
2. Охолодження повітря між ступенями компресора можливо практично до температури повітря на вході, що забезпечує близьке до ізотермічного стиснення повітря (функція проміжного охолоджувача повітря);
3. Стиснення повітря в аеротермокомпресорі дозволяє зменшити роботу стиснення в компресорі (функція дотискуючого ступеня компресора);
4. Уприскування і випаровування води в аеротермокомпресорі забезпечує збільшення масової витрати робочого тіла (за рахунок водяної пари), а відтак зростання корисної потужності ГТУ;
5. Багатофункціональність аеротермокомпресора дозволяє підвищити надійність ГТУ, збільшити питому потужність і ККД.
6. Наступним розвитком запропонованих схемних рішень може бути застосування аеротермокомпресора для проміжного охолодження в більш складних схемах ГТУ, наприклад, у двовальних установках (рис. 9).

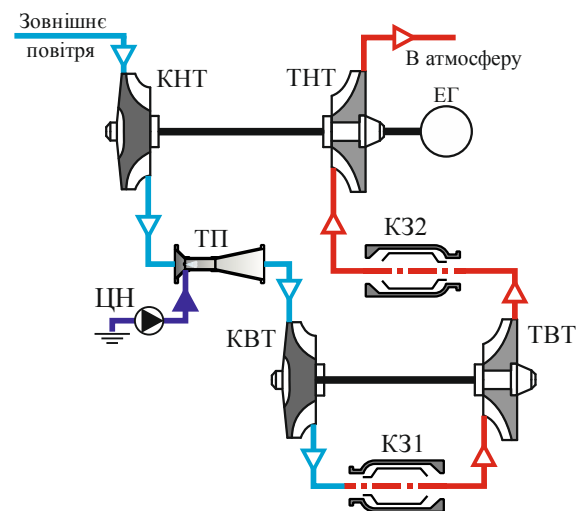


Рис. 9. Схема двовальної ГТУ із застосуванням аеротермокомпресора між ступенями компресора:
 КНТ – компресор низького тиску; КВТ – компресор високого тиску; КЗ1, КЗ2 – камери згоряння;
 ТНТ – турбіна низького тиску; ТВТ – турбіна високого тиску; ТП – аеротермокомпресор;
 ЦН – циркуляційний насос; ЕГ – електрогенератор

Висновки

1. Застосування проміжного охолодження повітря упорскуванням води аеротермопресором дозволяє підвищити ККД циклу ГТУ з регенерацією на 0,5...2,01 %, а ГТУ складного циклу зі ступінчастими стисненням і розширенням – на 2,0...4,0 %.

2. Введення води аеротермопресором в цикл ГТУ забезпечує збільшення масової витрати робочого тіла, а відтак збільшить корисну потужність ГТУ.

3. Розроблено схемні рішення проміжного охолодження повітря ГТУ упорскуванням води аеротермопресором.

Література

1. Дикий, М. О. Підвищення ефективності ГПТУ «Водолій» охолодженням повітряного потоку в компресорі [Текст] / М. О. Дикий, А. С. Соломаха, В. Г. Петренко. // Наукові вісті НТУУ КПІ. – 2011. – № 5. – С. 31–34.

2. Шевелев, Д. В. Влияние испарительного охлаждения рабочего тела на удельные параметры газотурбинных установок малой мощности [Текст] / Д. В. Шевелев, Н. В. Гриднич. // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 4. – С. 333–338.

3. Biasi, V. LM6000 Sprint design enhanced to increase power and efficiency [Text] / Victor de Biasi // GasTurbineWorld. – July-Augus, 2000. – P. 16–20.

4. Chaker, M. Key parameters for the performance of impaction-p in nozzles used in inlet fogging of gasturbineengines [Text] / M. Chaker // Proceedings of ASME turboexpo, 2005. – PaperNo: GT2005-68346.

5. Коновалов, Д. В. Термопресорні системи охолодження суднових ДВЗ [Текст] / Д. В. Коновалов // Авиационно-космическая техника и технология. – 2011. – № 10 (87). – С. 44–48.

6. Вулис, Л. А. Термодинамика газовых потоков [Текст] / Л. А. Вулис. – Москва, Ленинград : Госэнергоиздат, 1950. – 304 с.

7. Степанов, И. Р. Некоторые задачи движения газа и жидкости в каналах и трубопроводах энергоустановок [Текст] / И. Р. Степанов, В. И. Чудинов. – Ленинград : Наука. Ленингр. отделение, 1977. – 199 с. – (АН СССР, Кольск. филиал им. С.М. Кирова).

References

1. Dykyu, M. O., Solomakha, A. S., Petrenko, V. H. Pidyvshchennya efektyvnosti HPTU "Vodoliy" okholodzhennyam povitryanoho potoku v kompresori [Increased efficiency GSTP "Vodoliy" by cooling air stream in the compressor]. *Naukovi visti NTUU KPI*, 2011, no. 5, pp. 31–34.

2. Shevelev, D. V., Gridnich N. V. Vlianiye isparitel'nogo ohlazhdeniya rabocheho tela na udel'nye parametry gazoturbinykh ustanovok maloy moshhnosti [The effect of evaporative cooling of the working fluid on the specific parameters of gas turbine units of low power]. *Fundamental'nye issledovaniya*, 2016, no. 4, pp. 333–338.

3. Victor de Biasi, LM6000 Sprint design enhanced to increase power and efficiency. *GasTurbineWorld*, July-August, 2000, pp. 16–20.

4. Mustapha, Ch. Key parameters for the performance of impaction-pin nozzles used in inlet fogging of gas turbine engines. *Proceedings of ASME turbo expo*, 2005, vol. 4, pp. 91–97.

5. Konovalov, D. V. Termopresorni systemy okholodzhennya sudnovykh DVZ [The thermopressor systems of cooling air of engine ships]. *Aviacionno-kosmicheskaya tehnika i tehnologiya – Aerospace technics and technology*, 2011, no. 10 (87), pp. 44–48.

6. Vulis, L. A. Termodinamika gazovykh potokov [Thermodynamics of gas flows]. Moscow, Leningrad, *Gosenergoizdat Publ.*, 1950. 304 p.

7. Stepanov, I. R., Chudinov, V. I. Nekotorye zadachi dvizheniya gaza i zhidkosti v kanalakh i truboprovodakh energoustanovok [Some problems of the gas and liquid motion in the channels and pipelines of power plants]. Leningrad, *The Science Publ., Leningrad department*, 1977. 199 p.

Надійшла до редакції 14.02.2017, розглянута на редколегії 8.06.2017

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОМЕЖУТОЧНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ВОЗДУХА ГАЗОТУРБИНЫХ УСТАНОВОК ВПРЫСКОМ ВОДЫ АЭРОТЕРМОПРЕССОРОМ

Н. И. Радченко, Д. В. Коновалов, Г. А. Кобалава

Проведен сравнительный анализ существующих схем газотурбинных установок простого и сложного циклов с промежуточным охлаждением воздуха путем впрыска воды и предложенных схемных решений с применением аеротермопресора. Принцип охлаждения с использованием эффекта аеротермопрессии, или так называемой термогазодинамической компрессии, состоит в повышении давления газа (воздуха) в процессе мгновенного испарения воды, впрыскиваемой в газовый (воздушный) поток, ускоренный до скорости,

близкой звуковой. В результате расчетов показано, что применение аэротермопрессора позволяет повысить КПД газотурбинных установок с регенерацией на 0,5...2,0 %, а установок сложного цикла со ступенчатыми сжатием и расширением – на 2,0...4,0 %.

Ключевые слова: термогазодинамическая компрессия, аэротермопрессор, газотурбинная установка, впрыск воды, компрессор, рабочее тело.

ANALYSIS OF EFFICIENCY AIR INTERMEDIATE COOLING OF GAZ TURBINE UNITS THROUGH WATER INJECTION BY AEROTHERMPRESSOR

M. I. Radchenko, D. V. Konovalov, H. A. Kobalava

The comparative analysis of conventional schemes of gas turbine units of simple and complex cycles with intermediate air cooling by water injection and proposed schemes with aerothermopressor is carried out. A principle of cooling with the use of aerothermopressor effect, or so called, thermogasdynamics compression, is in increase of gas (air) pressure during instantaneous evaporation of water, injected into gas (air) stream accelerated up about to the sound velocity. The results of calculations has shown that the use of aerothermopressor allows to increase the efficiency of the gas turbine units with regeneration by 0,5...2,0 %, and for the units of complex cycle with stage compression and expanding – by 2,0...4,0 %.

Keywords: thermogasdynamics compression, aerothermopressor, gas turbine unit, water injection, compressor, working fluid.

Радченко Микола Іванович – д-р техн. наук, проф. зав. кафедри кондиціонування та рефрижерації, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна, e-mail: nirad50@gmail.com.

Коновалов Дмитро Вікторович – канд. техн. наук, доцент кафедри теплотехніки, Херсонська філія Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, Херсон, Україна, e-mail: dimitriyko79@gmail.com.

Кобалава Галина Олександрівна – аспірант кафедри кондиціонування та рефрижерації, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна, e-mail: g.lavamay@gmail.com.

Radchenko Mykola Ivanovych – Doctor of Technical Science, head of Air Conditioning and Refrigeration chair, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: nirad50@gmail.com.

Konovalov Dmitriy Victorovich – Candidate of Technical Science, associate professor of Thermal Engineering chair, The Kherson Branch of the National University of Shipbuilding named after Admiral Makarov, Kherson, Ukraine, e-mail: dimitriyko79@gmail.com.

Kobalava Halina Aleksandrovna – Post graduate student of Air Conditioning and Refrigeration chair, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: g.lavamay@gmail.com.