

УДК 621.444.5

В.В. ПАНІН, М.О. ДИКИЙ, А.С. СОЛОМАХА, В.Г. ПЕТРЕНКО

*Київська державна академія водного транспорту
ім. гетьмана Петра Конашевича-Сагайдачного, Україна***РЕАЛІЗАЦІЯ «ВОЛОГОГО СТИСНЕННЯ» В ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНАХ**

Наведено аналітичний огляд експериментальних досліджень по охолодженню циклового повітря в газотурбінних двигунах шляхом його змішування з дисперговою водою. Розглянуто технічні труднощі при його реалізації та наведено основні вимоги щодо якості розпилю. Проаналізовано ефективність використання різних способів впорскування води в повітряний потік. Відмічено, що для ефективної реалізації «вологого стиснення» традиційні способи розпилення води малоєфективні та необхідні принципово нові підходи. Серед найбільш перспективних відзначено ударне розпилення та використання перегрітої води. Наведено основні розрахункові залежності для оцінки впливу «вологого стиснення» на ефективність роботи компресора.

Ключові слова: вологе стиснення, газотурбінний двигун, розпилення, діаметр краплі, перегріта вода, компресор.

Вступ

Відомим способом, який дає можливість підвищити ефективність газотурбінного двигуна, є впорскування води в проточну частину компресора [1 – 7]. Випаровування води всередині компресора забезпечує безперервне охолодження, що призводить до зменшення температурного перепаду на стиснення та зменшення роботи на компресор. Крім того, збільшується кількість робочого тіла в циклі та зменшуються викиди оксидів азоту. В результаті вдається відносно просто підвищити ефективність роботи всієї установки.

Виконані дослідження свідчать про можливість випаровування в компресорі води в кількості, яка достатня для суттєвого зниження роботи стиснення. При цьому, кількість води, що випаровується, залежить як від параметрів води та конструктивних особливостей компресора, так і від температури навколишнього повітря.

В той же час, внаслідок подачі і випаровування води виникає загроза таких небажаних явищ, як ерозія лопаток та утворення накипу. В результаті жорсткі умови висуваються до способу розпилення та до якості води, що подається на форсунку.

В статті розглядаються можливі шляхи реалізації процесу «вологого стиснення» та підходи щодо оцінки отриманого ефекту від його реалізації.

1. Огляд різних способів подачі води

Найбільш інтенсивно процес випаровування краплі відбувається безпосередньо в факелі розпи-

леної води. Зокрема, відомо, що за першу секунду крапля, що має початковий діаметр 14 мкм встигає зменшитися до розміру менше 5 мкм [8]. Крім того, в ході проведених експериментальних досліджень було встановлено, що якщо діаметр крапель води в проточній частині компресора не перевищує 10 мкм, то вони рухаються безпосередньо за потоком повітря і на них мало впливають відцентрові сили [9, 10].

З цієї точки зору, в ідеальному випадку встановлені форсунки системи «вологого стиснення» повинні на вході в компресор утворювати краплі з діаметром не більше 20 – 25 мкм.

Отримання необхідного розміру крапель не є простим завданням. Так традиційні механічні та гідравлічні форсунки з робочим тиском навіть до 300 бар не забезпечують необхідної якості розпилення [11].

Крім того, при таких високих рівнях тиску важливою проблемою стає забезпечення абсолютної надійності форсунок. Відірване сопло представляє величезну небезпеку як для компресору, так і для всієї газової турбіни. Деякі виробники розпилювальних систем охолодження усвідомлюють цю небезпеку та встановлюють спеціальні «перев'язки» (зроблені з пластику чи сталюї проволочи), які втримають сопло, якщо воно від'єднається від лінії постачання. Кожного разу при заміні сопла ці перев'язки необхідно відрізати та встановлювати нові. Якщо прийняти до уваги, що на вході в потужну газову турбіну може встановлюватися декілька сотень таких форсунок та перев'язок, то, очевидно, що небезпека відриву хоча б однієї частинки зростає експоненційно. В зв'язку з цим, деякі виробники

розпилювальних систем намагаються встановлювати форсунки для розпилення далеко від входу компресора. В такому випадку, якщо сопло відірветься, то воно впаде у вхідному повітряному каналі і не потрапить до компресору [11].

Одним з відомих шляхів досягнення необхідної якості диспергації води є пневматичне розпилення. Прикладом реалізації такої системи є двигун LM6000 Sprint виробництва компанії General Electric (див. рис.1), в якому відбувається впорскуванням води і на вході в компресор, і між його ступенями. Це дозволило підвищити потужність на 12% в умовах ISO та більш ніж на 30% при температурі навколишнього повітря 32 оС [12]. Для досягнення необхідної якості вода розпилюється за допомогою забору частини повітряного потоку з компресора.

Аналогічний підхід щодо розпилення було досліджено на двигуні General Electric MS7001 [6]. Частина форсунок в цій системі було встановлено на вході перед фільтрами. Вони впорскували 87 літрів за хвилину та реалізовували випарне охолодження повітря, що збільшило потужність установки на 10% (з 61 до 67,1 МВт). Інша частина форсунок було встановлено безпосередньо на вході в компресор після шумоглушника. Вони забезпечували подачу ще 87 літрів води за хвилину безпосередньо в компресор, що додатково дало 3,8% приросту потужності (до 69,4 МВт). Форсунки, що встановлені перед повітряним фільтром не вимагають води високої якості. В такому випадку хорошої якості має бути лише вода, що використовується для «вологого стиснення».

Основним недоліком подібних систем є висока енергоємність пневматичного способу розпилення, що становить не менше 50...60 кВт на 1т рідини. Для умов ГТУ це означає, що частина повітря забирається з циклу для реалізації процесу вологого сти-

снення. Крім того при пневматичному розпиленні достатньо висока дисперсія діаметрів крапель.

Оригінальне рішення проблеми розпилення застосовано компанією Mee Industries Inc [7, 10]. Для подачі води в потік циклового повітря були розроблені форсунки спеціальної конструкції, в яких розпилення реалізується за рахунок ударної дії: вода під високим тиском (150...200 бар) подається на головку форсунки, в результаті удару отримують каплі діаметром не більше 50 мкм.

Незважаючи на відносно широке розповсюдження, такі системи вимагають доволі складного насосного обладнання подачі води та створюють відомі труднощі при експлуатації системи під високим тиском.

Серед новітніх підходів, особливо привабливим способом підвищення якості розпилення є використання теплофізичних властивостей «вибухового скипання» води при її перегріві відносно температури насичення. В кінці 90-х років ХХ століття було запропоновано подавати на форсунку воду, яка перегріта відносно температури насичення при даному тиску в місці впорскування (так звана swirl-flash технологія), коли «гідродинамічне» подрібнення закрученої (swirl) рідинної плівки на виході з форсунки багаторазово підсилюється при різкому скипанні в її об'ємі (flash) [9].

Фізичний зміст полягає в тому, що вода стискується та нагрівається до температури, яка вище від її температури насичення в повітряному потоці (рис. 2). В такому випадку на виході з форсунки відбувається миттєве скипання води та за рахунок цього досягається додаткове розбиття факелу розпилення. Крім того, вода знаходиться в насиченому стані, отже відразу починається процес активного випаровування.

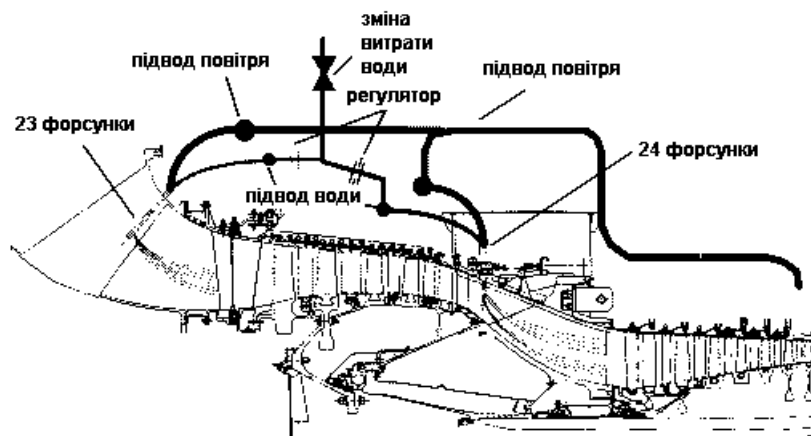


Рис. 1. Двигун LM6000 Sprint з «вологим стисненням»

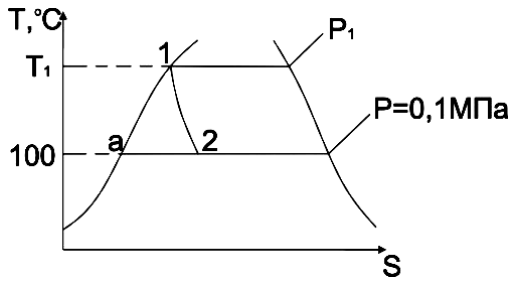


Рис. 2. T-s – діаграма впорскування перегрітої води

В Інституті високих температур Російської АН було проведено детальні дослідження розпилення перегрітої води в повітряному потоці [9, 13], які показали, що при температурі води 220-240 оС та тиску перед форсункою близько 8МПа вдається організувати необхідний тонкий розпил: 70% крапель по масі мають діаметр менше 3 мкм. При цьому було проведено досліди не лише з відцентровими форсунками, а і з струйними. Досліди по визначенню дисперсних характеристик повітряно-крапельного потоку показали, що для обох типів форсунок вони дуже близькі: як розподілення, так і швидкість розльоту крапель, в першу чергу, визначається не конструкцією форсунки, а «вибуховим» утворенням крапель в процесі інтенсивної генерації парової фази на виході з сопла форсунок.

В умовах ГТУ воду необхідних параметрів відносно легко отримувати за допомогою додаткової, більш глибокої утилізації теплоти відпрацьованих газів (рис. 3). Це дозволяє, крім зменшення енергетичних затрат на організацію процесу безпосереднього розпилення, повертати частину низькопотенційної теплоти в цикл енергоустановки разом з впорскнутою водою, що, крім всього іншого, підвищує коефіцієнт використання теплоти палива.

2. Оцінка впливу «вологого стиснення» на роботу компресора

При вводі води в компресор допустима максимальна кількість води в термодинамічному плані визначається з урахуванням температури після компримування при «сухому» стисненні, парціального тиску водяної пари в потоці пароповітряної суміші та температури при вологому стисненні. З урахуванням теплообміну між краплями води та повітрям отримана кількість води повинна бути зменшена.

Так як впорскування відбувається в зону дії відцентрових сил, то в процесі стиснення відбувається значна сепарація крапель на корпус компресора, і, як наслідок, значно зменшується розмір змоченої поверхні лопаток, з якої відбувається випаровування води. Це призводить до того, що максимальна кількість води, яка може подаватися на вхід компресора часто не перевищує 1...2,5% від витрати повітря [1, 2, 9]. Оскільки, при подачі більшої кількості вода не встигає випаровуватися в проточній частині компресора і у вигляді плівки сповзає по його корпусу в камеру згорання. Там рідина довипаровується за рахунок теплоти палива, що відразу зменшує коефіцієнт корисної дії установки.

Для зменшення впливу відцентрових сил на краплі води в відносно потужних ГТД використовують подачу частини води в перехідник між компресорами високого та низького тиску. В таких міжкаскадних системах воду розпилюють за допомогою форсунок, які встановлюють на направляючих лопатках частини ступіней компресора. Це дозволяє перерозподілити кількість впорскнутої води, тобто на вхід компресора подається така кількість води, яка забезпечує «вологе стиснення» компресору низького тиску.

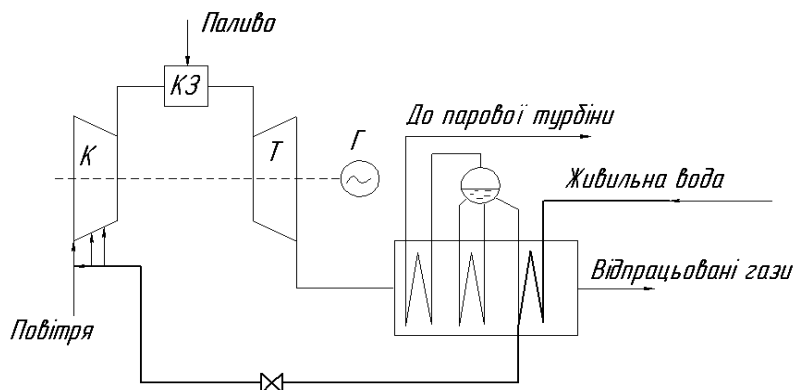


Рис. 3. Принципова схема ГТУ з реалізацією охолодження повітря перегрітою водою

Решта води впорскується безпосередньо перед компресором високого тиску, тому їй не потрібно проходити зайвий шлях в зоні дії відцентрових сил в компресорі низького тиску. Крім того подача води в область з більш високою температурою сама по собі забезпечує інтенсивніше протікання процесу випаровування. Застосування подібних систем дуже ефективно для установок з високим ступенем стиснення.

Необхідно відмітити, що хоча для підігріву охолодженого пароповітряного потоку до початкової температури циклу потрібна більша кількість палива (в порівнянні з процесом без охолодження), але з термодинамічної точки зору корисний ефект від реалізації процесу охолодження значно вищий, ніж збільшення витрати палива на підігрів повітря. В результаті вдається підвищити ефективність роботи всієї установки. Вплив «вологого стиснення» на камеру згорання та турбіни також існує, але він незрівнянно менше в порівнянні з компресором [8]. Слід також зазначити, що всі вказані процеси досить складні і мають багато особливостей, які суттєво залежать від конструктивного виконання конкретного двигуна.

Для оцінки протікання процесу вологого стиснення можна використовувати формулу [10]:

$$\frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^{\frac{k}{k-1} + \frac{L_p}{R} \frac{dW}{dT}}$$

де L_p – прихована теплота пароутворення;
 R – газова постійна;

$\frac{dW}{dT}$ – інтенсивність випаровування.

Очевидно, що при $\frac{dW}{dT} = 0$ рівняння спрощується до традиційного ізоентропічного процесу стиснення.

В той же час, зростання масового потоку в результаті впорскування води можна оцінити як [10]:

$$\alpha_t = \frac{30 \cdot \eta_p \cdot \log_e \frac{p_3^*}{p_2}}{\left[\left(\frac{T_3^*}{T_2} \right) - 1 \right] \cdot (1 - \psi^*)} \cdot \frac{w \cdot L_p}{\theta}$$

де η_p – політропічний ККД;
 p_3^* – тиск нагнітання;
 p_2 – тиск всмоктування;
 L_p – прихована теплота пароутворення для води;
 w – масове відношення пара/повітря;
 T_3^* – температура після стиснення;
 T_2 – температура на вході в компресор
 $\psi^* = f$ (кут лопаток).

Висновки

В роботі розглянуто основні сучасні підходи при реалізації «вологого стиснення» в газотурбінних двигунах. Відзначено, що однією з головних вимог для успішної реалізації процесу є забезпечення діаметру крапель на вході в компресор не більше 20 – 25 мкм. Для досягнення необхідної якості диспергації найбільш перспективними варіантами є ударне розпилення та використання перегрітої води. За проведеними дослідженнями вдається відносно простим способом підвищити потужність двигуна на 10...15%.

Незалежно від способу подачі води в повітряний потік його ефективність, в першу чергу, залежить від конкретних характеристик газотурбінного двигуна, кліматичних умовах та техніко-економічних факторів.

Література

1. Изменение характеристик ГТД при впрыске воды на вход в компрессор [Текст] / В.И. Романов, Н.А. Дикий, О.Г. Жирицкий и др. // Известия академии инженерных наук Украины: Сб. "Машипроект – 45 лет". – 1999. – Вып. 1. – С. 155 – 159.
2. Серета, С.О. Экспериментальное исследование влияния впрыска воды во входной канал многоступенчатого осевого компрессора на его характеристики [Текст] / С.О. Серета, Ф.Ш. Гельмедов, И.Г. Мунтянов // Теплоэнергетика. – 2004. – № 5. – С. 66 – 71.
3. Расчетное исследование влияния впрыска воды на характеристики компрессора газотурбинной установки ГТ-009 [Текст] / Ю.М. Ануров, А.Ю. Пеганов, А.В. Скворцов и др. // Теплоэнергетика. – 2006. – № 12. – С. 19 – 24.
4. Арсеньев, Л.В. Параметры газотурбинных установок с впрыском воды в компрессор [Текст] / Л.В. Арсеньев, А.Л. Беркович // Теплоэнергетика. – 1996. – № 6. – С. 18 – 22.
5. Скворцов, А.В. Повышение параметров газотурбинных установок путём впрыска воды в проточную часть и оптимизации рабочего процесса в компрессоре [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.04.12 / Скворцов Александр Всеволодович. - Петерб. гос. ун-т. – СПб., 2010. – 20 с.
6. Influence of High Fogging Systems on Gas Turbine Engine Operation and Performance [Text] / G. Cataldi, H. Güntner, C. Matz et al. // J. Eng. Gas Turbines Power. – January 2006. – 128. – P. 135 – 144.
7. Chaker, M. Inlet Fogging of Gas Turbine Engines [Text] / M. Chaker // Proc. of ACME TURBO EXPO 2000, June 3–6. – Amsterdam, 2002. – P. 113 – 138.
8. Turbines in the Mist [Text] / M. Holmberg, D. Herbig, S. Shilinski and others // Power plant technology. – July/August 2000. – P. 17 – 19.

9. Теплофизические и инженерные проблемы мелкодисперсного распыла и впрыска воды в компрессор ГТУ [Текст] / В.Б. Алексеев, В.И. Залкин, Ю.А. Зейгарник и др. // Труды пятой Российской национальной конференции по теплообмену. – М., 2010. – Т. 5. – С. 125 – 128.

10. Thomas, R. Inlet fogging of gas turbine engines. Part A: theory, psychrometrics and fog generations [Text] / R. Thomas. – Proc. of ASME Turbo Expo 2000, May 8-11, Munich. – Paper No: 2000-GT-307.

11. Wilson, D.G. The design of high efficiency turbo-machinery and gas turbine [Text] / D.G. Wilson. – Massachusetts Institute of Technology. – 1984. – 342 p.

12. Giampaolo, A. Gas turbine handbook: principles and practices [Text] / Anthony Giampaolo. – The Fairmont Press, INC, 2006. – 437 p.

13. Распыление перегретой воды: результаты экспериментальных исследований [Текст] / Л.А. Домбровский, В.И. Залкин, Ю.А. Зейгарник и др. // Теплоэнергетика. – 2009. – № 3. – С. 23 – 27.

Надійшла в редакцію 28.05.2013, розглянута на редколегії 14.06.2013

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.В. Єпіфанов, Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «ХАІ», Харків.

РЕАЛИЗАЦИЯ «ВЛАЖНОГО СЖАТИЯ» В ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЯХ

В.В. Панин, Н.А. Дикий, А.С. Соломаха, В.Г. Петренко

Приведен аналитический обзор экспериментальных исследований по охлаждению циклового воздуха в газотурбинных двигателях путем его смешивания с диспергированной водой. Рассмотрено технические сложности при его реализации и приведено основные требования касательно качества распыления. Проанализировано эффективность использования разных способов впрыска воды в воздушный поток. Отмечено, что для эффективной реализации «влажного сжатия» традиционные способы распыления воды малоэффективны и необходимы принципиально новые подходы. Среди наиболее перспективных отмечено ударное распыление и использование перегретой воды. Приведены основные расчетные зависимости для оценки влияния «влажного сжатия» на эффективность работы компрессора.

Ключевые слова: влажное сжатие, газотурбинный двигатель, распыление, диаметр капли, перегретая вода, компрессор.

FOG COMPRESSION IN GAS TURBINE ENGINES

V.V. Panin, M.O. Dikiy, A.S. Solomakha, V.G. Petrenko

The state-of-art review of experimental investigations on cycle air cooling in gas turbine engines by mixing air with dispersed water has been considered. Technical complications of its realization have been examined and main demands for atomization property have been produced. The efficiency of different ways of water injection in air stream has been analyzed. Marked, that for effective fog compression traditional ways of water atomization are unproductive and principal new methods of approaching are required. Among such perspective methods impact atomization and superheated water using have been marked. Main calculation dependences for fog compression impact on compressor works has been showed.

Key words: fog compression, gas turbine engine, atomization, droplet diameter, superheated water, compressor.

Панин Владислав Вадимович – д-р техн. наук, профессор, ректор Київської державної академії водного транспорту, Київ, Україна.

Дикий Микола Олександрович – д-р техн. наук, професор кафедри суднових енергетичних установок, допоміжних механізмів суден та їх експлуатації Київської державної академії водного транспорту, Київ, Україна, e-mail: Dikiy_M_O@ukr.net.

Соломаха Андрій Сергійович – науковий співробітник Київської державної академії водного транспорту, Київ, Україна, e-mail: as_solomaha@ukr.net.

Петренко Валерій Георгійович – старший науковий співробітник Київської державної академії водного транспорту, Київ, Україна, petrko@ukr.net.