

4. ГГТА М91Л(П). Требования контролепригодности изделия средствами технической диагностики. М91ТП-053. ЦНИОКР «Машпроект». – 2008. – 8с.
5. Описание система типа VM600, 2010 - Режим доступа: <http://www.vibrometer.ru/industrial/VM600.htm>
6. Пат. 2036442 РФ. Способ диагностики состояния механизма в процессе эксплуатации и устройство для его осуществления /А.Л. Горелик, В.К. Алексеев, И.В. Егоров, А.В. Масловский, Л.Г. Меньшиков, А.Б. Тягунов, Е.Г. Перепелицин. Приоритет 27.05.95. Пат. 2112936 РФ. Способ диагностики технического состояния механизма в процессе его эксплуатации и устройство для его осуществления/ А.Л. Горелик, А.В. Масловский, Л.Г. Меньшиков, Е.Г. Перепелицин, А.Б. Тягунов, С.С. Эпштейн. Приоритет 10.06.98.
7. Новиков А.С., Пайкин А.Г., Сиротин Н.Н. Контроль и диагностика технического состояния газотурбинных двигателей. М.: Наука, 2007. – 469с.
8. Справочник инженера-механика судовых газотурбинных установок. – Л.: «Судостроение». – 1985. – 366с.
9. Техническая эксплуатация судовых газотурбинных установок.– М.: «Транспорт».1986. – 222с.
- 10.Иноземцев А.А., Нихамкин М.А., Сандрацкий В.Л. Газотурбинные двигатели. Автоматика и регулирование авиационных двигателей и энергетических установок. – М.: «Машиностроение». 2007. – 194 с.

Воробйов Ю.М.

УДОСКОНАЛЕННЯ БОРТОВИХ СИСТЕМ ДІАГНОСТУВАННЯ СУДНОВИХ ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ

У статті проводиться аналіз системи діагностування газотурбінного двигуна морського виконання ДК91 головного газотурбінного агрегату типу М91 перспективного українського корвета і пропонуються шляхи підвищення її ефективності. Наукова новизна роботи полягає в тому, що за результатами проведеного аналізу бортової системи діагностування ГГТА типу М91 пропонуються моделі вібраційного сигналу, які дозволяють підвищити ефективність системи діагностування.

Ключові слова: газотурбінний двигун, вібродіагностика, удосконалення, що огинає.

Vorobjov U.

IMPROVING ONBOARD DIAGNOSTIC SYSTEMS OF GAS TURBINE ENGINES

The article analyzes the diagnostic system of marine gas turbine engine performance DK91 of the main turbine unit type M91 applied for prospective Ukrainian corvette, and suggests the ways of improving its efficiency. Scientific novelty of the work lies in the fact that according to the results of the analysis of on-board diagnostic system M91-type GGTA, the vibration signal models able to improve the system's efficiency, are proposed.

Keywords: gasturbine engine, vibrodiagnostics, improvement, bending-type.

УДК 536.248.

Дикий М.О., Соломаха А.С., Петренко В.Г.

ТЕПЛОМАСООБМІН ПРИ ВИПАРОВУВАННІ КРАПЕЛЬ ПЕРЕГРІТОЇ ВОДИ В ПОВІТРЯНОМУ ПОТОЦІ

У статті розглянуто основні положення процесу охолодження повітряного потоку водою високої температури. Використання перегрітої води є особливо привабливим для

реалізації випарного та проміжного охолодження циклового повітря газотурбінного двигуна, так як в результаті вдається значно покращити якість розпилення та інтенсифікувати тепломасообмінні процеси.

Ключові слова: випарне охолодження, перегріта вода.

Постановка проблеми. В останні роки спостерігається яскраво виражена світова тенденція до більш широкого впровадження різноманітних газопаротурбінних енергетичних установок, ККД яких вже досягає 60% [1].

При цьому, одним із основних напрямків покращення основних параметрів газопаротурбінних енергетичних установок є зменшення залежності корисної потужності двигуна від параметрів навколишнього середовища. Відомо, що при підвищенні температури навколишнього повітря з 15°C до 35°C вихідна потужність двигуна падає приблизно на 15-20% (рис. 1) [2].

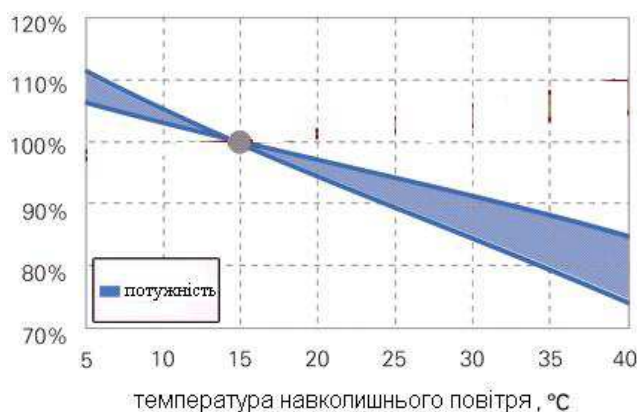


Рис. 1. Усереднена залежність потужності простого ГТД від температури навколишнього середовища

Така суттєва залежність потужності від температури робить вигідним в багатьох випадках встановлювати різноманітні системи охолодження повітря на вході ГТД та між ступенями компресора. Найпростіше охолодити повітря можна за допомогою подачі води в повітряний потік. Коли суміш повітря та води проходить через компресор та стискується, вода випаровується та ефективно охолоджує повітря в перших ступенях компресора, в яких стискується не гомогенна суміш повітря та парів води, а гетерогенна суміш вологого повітря та крапель води. Проте, наявність в потоці крупних крапель (більше 30 мкм) викликає небезпеку ерозійного зношення лопаток перших ступенів компресора [3].

Одним із можливих варіантів реалізації необхідного мілкодисперсного розпилення є використання води, яка перегріта відносно температури насичення в повітряному потоці. В результаті, на виході з форсунки відбувається «вибухове скипання» води, що суттєво зменшує розмір утворених крапель [4-5]. Воду необхідних параметрів можна отримувати в утилізаційному контурі газопаротурбінної установки.

Постановка завдання. Експериментальні дослідження показали позитивний вплив перегріву води на дисперсні характеристики [6]. Разом з тим, залишається практично невивченою поведінка гарячих крапель води в потоці повітря. В зв'язку з цим, існує необхідність розробки математичної моделі процесів тепломасообміну з метою дослідження та визначення довжини ділянки випаровування, часу випаровування та діаметру крапель на вході в компресор.

Термодинамічні основи процесу охолодження повітряного потоку водою високої температури.

При охолодженні повітря гарячою водою одночасно протікає декілька процесів, які мають взаємний вплив один на одного: дифузія, молярне перенесення теплоти та маси,

променистий теплообмін, термічна дифузія та неізотермічна масопровідність. Інтенсивність цих елементарних процесів, а також їх відносний вплив визначається початковими умовами, характером диспергування води, геометрією випарної ділянки та ін.

У залежності від співвідношення між паровмістом насиченого повітря біля краплі та паровмісту в об'ємі повітря відбувається або випаровування, або конденсація [7]. Перегріта вода, що подається для охолодження циклового повітря має високу пружність парів біля поверхні краплі. Внаслідок цього, якщо повітря ненасичене, то з'являється рушійна сила масообміну, під дією якої пара, що утворюється на поверхні краплі, переходить в прилеглі шари повітря і далі під дією дифузії поширюється в основний об'єм повітря.

Процес масовіддачі особливо бурхливо протікає в початковий момент, коли різниця тисків пари біля поверхні краплі та в оточуючому середовищі максимальна. Теплота, витрачена на випаровування води, може надходити від двох джерел: самої краплі та повітря, якщо його температура перевищує температуру крапель. В початковий момент впорскування перегрітої води її температура вище температури навколишнього повітря, тому випаровування краплі буде відбуватися лише за рахунок її внутрішньої теплоти, в результаті чого температура води буде зменшуватися. Процес буде продовжуватися до тих пір, поки температура краплі не стане нижче температури повітря.

Кількість теплоти, що підводиться до краплі від повітря:

$$q_{\text{конв}} = \alpha \cdot (T_n - T_e), \quad (1)$$

де α – коефіцієнт теплообміну;

T_n – температура повітря;

T_e – температура краплі води.

Кількість теплоти, що відводиться від краплі у вигляді пари:

$$q_{\text{маса}} = \beta \cdot L \cdot (C_e - C_n), \quad (2)$$

де L – прихована теплота пароутворення;

β – коефіцієнт теплопереносу;

C_e і C_n – паровміст відповідно біля поверхні краплі і в повітряному потоці.

Різниця температур ($T_n - T_e$) називається рушійною силою тепловіддачі, а різниця концентрацій ($C_e - C_n$) – рушійною силою масообміну.

У початковий момент часу $q_{\text{маса}} = f(T_e)$ більше $q_{\text{конв}} = \alpha \cdot (T_e)$, тому випаровування відбувається з використанням внутрішньої теплоти води, величина якої визначається як різниця $q = q_{\text{маса}} - q_{\text{конв}}$.

Коли теплота, яку отримує вода від повітря, виявиться рівною теплоті, що витрачається на випаровування, тобто $q_{\text{маса}} = q_{\text{конв}}$, то зміна температури води припиниться. Цю рівноважну температуру води називають температурою мокрого термометра T_m .

Прирівнявши праві частини рівнянь (1) та (2) отримуємо аналітичний вираз для температури термодинамічної рівноваги [8]:

$$T_m = T_n - (L \cdot \beta / \alpha) \cdot (C_e - C_n), \quad (3)$$

де T_n – температура повітря.

Для аналітичного визначення температури мокрого термометра з достатньою точністю коефіцієнти тепло- та масовіддачі можна замінити їх відношенням [9]:

$$\alpha / \beta = c_{n2}, \quad (4)$$

де c_{n2} – ізобарна теплоємність парогазової суміші.

Так як концентрація пари – це фактично паровміст, то рівняння можна записати у вигляді:

$$T_m = T_n - L \cdot c_{n2} \cdot (d_g - d_n), \quad (5)$$

де d_g і d_n – паровміст відповідно біля поверхні краплі води та в повітряному потоці.

При досягненні краплями температури мокрого термометра в ненасиченому повітряному потоці відведення теплоти не припиняється і продовжується при постійній температурі крапель. Про температурний режим крапель при цьому можна зробити два припущення:

- температура краплі коливається навколо рівноважного значення та змінюється по всьому об'єму;
- температура краплі не змінюється в результаті «пошарового» випаровування рідини.

Перше припущення відповідає коефіцієнту теплопровідності води $\lambda = \infty$, а друге $\lambda = 0$. Так як вода має кінцеве значення коефіцієнту теплопровідності, то обидва припущення невірні. Проте розрахунки за стаціонарним температурним режимом дають хорошу збіжність результатів.

Після досягнення краплею температури мокрого термометра подальше її випаровування відбувається за лінійним законом Срезневського [11] $df/dt = const$ завдяки теплоті, що відбирається від повітря через різницю пружностей пари біля поверхні краплі та в об'ємі повітря.

Якісна картина зміни температури води та повітря (T) по довжині тепломасообмінної ділянки (L) показана на рисунку 2.

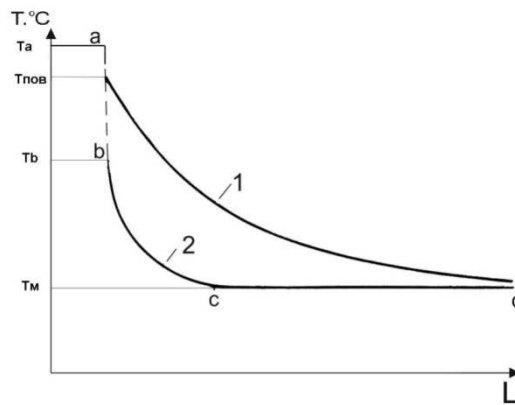


Рис. 2. Якісна картина зміни температури повітря (1) та води (2) по довжині теплообмінної ділянки

На початковому етапі в результаті подачі перегрітої води відбувається бурхливий процес тепломасообміну за рахунок розширення води у форсунках на ділянці $a-b$ та охолодження води до температури мокрого термометра на ділянці $b-c$.

При досягненні краплями температури T_m відведення теплоти не припиняється так як в ненасиченому повітряному потоці температура термодинамічної рівноваги (мокрого термометра) завжди нижче температури повітря. Охолодження повітря продовжується при постійній температурі крапель на ділянці $c-d$.

Випаровування крапель води в потоці повітря.

Експериментальному дослідженню процесів випаровування диспергованих рідин присвячено багато робіт, серед яких найбільш фундаментальними є [9-13]. У цілому в цих роботах досліджується випаровування в стаціонарних процесах, коли перенос теплоти та маси відбувається при постійних температурах краплі та повітряного потоку. Що ж стосується випаровування в нестационарній області, тобто в області теплової релаксації, то експериментальні дані тут практично відсутні. Це пов'язано в основному із труднощами реєстрації швидкоплинних теплових процесів не тільки всередині краплі, а і в її пограничному шарі.

Згідно з найбільш поширеною молекулярною гіпотезою випаровування відбувається за рахунок теплового руху молекул в рідині. Молекули, кінетична енергія яких достатня для подолання міжмолекулярного зчеплення, можуть покинути шар рідини та опинитися в навколишньому середовищі. Частина цих молекул в результаті зіткнення з іншими молекулами парогазового потоку може повернутися до поверхні краплі, а інша частина поширюється в навколишнє середовище за рахунок молярної та молекулярної дифузії. Завдяки малій швидкості відводу молекул пари в потік повітря та високій швидкості їх винесення з рідини на відстань вільного пробігу молекул, відбувається насичення повітря біля поверхневого шару краплі. Згідно досліджень, пара в цій області відрізняється від стану насичення при даній температурі поверхні краплі на 0,2...1,5%.

Найбільш характерною величиною, що визначається в експериментальних дослідженнях, є швидкість випаровування краплі:

$$t_{\text{вип}} = dm/d\tau \quad (6)$$

де m – маса краплі, $d\tau$ – час, протягом якого відбувається випаровування. Зміну маси краплі знаходять по зміні розміру краплі, припускаючи, що форма краплі симетрична відносно осі.

При русі краплі в потоці повітря її форма наближається скоріше до форми еліпсоїда обертання, ніж до шару. З переднього боку утворюється порівняно тонкий пограничний шар, в якому рух відбувається за законом в'язкої рідини [8]. За межами цього шару відбувається обтікання краплі за законами течії ідеальних рідин. Викривлення гідродинамічного шару призводить до відповідної зміни дифузійного пограничного шару та, як наслідок, до зміни закону випаровування. Проведені дослідження показали, що якщо крапля має форму еліпсоїда обертання з відношенням осей 1,5:1, то вона випаровується на 2% швидше, а при відношенні 2:1 на 4% швидше, ніж шароподібна крапля того ж об'єму [10]. Таким чином, порівняно велике викривлення форми краплі не дуже суттєво впливає на швидкість випаровування. В результаті в більшості існуючих моделях випаровування прийнято сферичну форму краплі.

Серед робіт по вивченню рухомих крапель найбільшою популярністю та достовірністю користується формула [9]:

$$Sh = 2 + 0,6 \cdot Re^{0,5} \cdot Sc^{0,33} \quad (7)$$

Очевидно, що при низьких значеннях критерію Рейнольдса $Sh \rightarrow 2$.

Рівняння (7) підтверджує аналогію між тепло- та масовіддачею, так як при застосуванні в якості русійної сили ΔT воно приймає вигляд:

$$Nu = 2 + 0,6 \cdot Re^{0,5} \cdot Pr^{0,33} \quad (8)$$

При цьому число Рейнольдса визначається з рівняння:

$$Re = d \cdot w \cdot (\rho_n / \mu_n), \quad (9)$$

де w – швидкість краплі відносно швидкості повітря.

Для умов впорскування води в потік циклового повітря ГТУ рідина розпилюється на дуже мілкі краплі, діаметром менше 0,1 мм. Тому для даного випадку низькі значення критерію Рейнольдса є звичним явищем.

У більшості відомих роботах вплив температури рідини на процес тепломасообміну не враховувався. Експериментальні дослідження показали, що рідина майже миттєво приймає температуру мокрого термометра, яка залежить лише від температури та відносної вологості повітря.

Для розуміння процесу теплової релаксації гарячої краплі води значний інтерес має протікання процесів переносу теплоти та маси в початковий період часу $0 < \tau \leq 0,1$ с. Цей період характеризується наступними факторами:

-
- Процеси протікають дуже інтенсивно (числові значення теплових та дифузійних потоків на декілька порядків вище, ніж в наступні періоди часу);
 - Формуються теплові та дифузійні пограничні шари, які визначають протікання процесів тепло- та масообміну на релаксаційній частині процесу охолодження крапель рідини в потоці повітря;
 - Практично відсутні достовірні експериментальні дані.

Згідно з сучасними уявленнями, в початковий момент часу завдяки відсутності теплових та дифузійних шарів відбувається високоінтенсивне випаровування з поверхні краплі, так як в цей момент градієнт концентрацій має найбільше значення. Це призводить до різкого охолодження поверхневого шару, тоді як в решті об'єму краплі температура близька або навіть дорівнює початковій. Сформований в результаті різкого охолодження поверхні градієнт температур всередині краплі призводить до більш плавного процесу вирівнювання температури краплі. Теплота, що витрачається на протікання цих процесів, надходить в основному від краплі та в меншій мірі від парогазового потоку. В подальшому зменшення температури краплі відбувається за рахунок зміни агрегатного стану води, тобто випаровування. При цьому температура краплі знижується по всьому об'єму, залишаючись трішки вище в центрі. В кінці релаксаційної ділянки вона вирівнюється по всьому об'єму і стає рівною температурі термодинамічної рівноваги.

Висновки

1. Застосування випарного та проміжного охолодження повітря ГТУ дозволяє суттєво підвищити потужність та коефіцієнт корисної дії енергоустановки. При цьому вирішальне значення для успішної реалізації процесу охолодження має якість розпилення.
2. Одним з найбільш перспективних сучасних способів покращення якості розпилення є використання перегрітої води, що утворюється за рахунок додаткової, більш глибокої утилізації теплоти відпрацьованих газів. Це дозволяє одночасно з проблемою охолодження повітря вирішити питання повернення частини теплоти в цикл енергоустановки у вигляді додаткового робочого тіла (пари).
3. Можливість експериментального дослідження таких швидкоплинних процесів як температурна релаксація краплі, випаровування рухомої краплі та ін., є досить обмеженою, що вимагає побудови адекватної математичної моделі для аналітичного дослідження процесу тепломасообміну при випаровуванні крапель перегрітої води в потоці циклового повітря.
4. Розроблена математична модель повинна обов'язково враховувати залежність температури краплі, зміну її відносної швидкості руху та діаметру від часу протікання процесу.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Полежаев Ю.В.* Парогазовые установки монарного типа. Проблемы и перспективы создания / Ю.В. Полежаев, Р.Р. Григорьянц, А.Н. Ермаков // Энергетика Татарстана. – 2009. – №1. – С.6-15.
2. A MeeFog inlet air cooling systems boost gas turbine output effectively, efficiently & economically [Електронний ресурс] / Режим доступу: <http://www.meefog.com/applications/gas-turbine-cooling/power-generation.php#sthash.v3idLh6X.dpuf>
3. *Григорьянц Р.Р.* Особенности поведения жидкой фазы в высокооборотных компрессорах конверсионных ГТУ и их влияние на характеристики и эффективность «влажного» сжатия / Р.Р. Григорьянц, В.И. Залкинд, Ю.А. Зейгарник и др. // Теплоэнергетика. – 2006. – №12. – с.19-29.
4. *Алексеев В.Б.* Развитие факела распыла перегретой воды в воздушном потоке / В.Б. Алексеев, В.И. Залкинд, Ю.А. Зейгарник и др. // Теплоэнергетика. – 2010. – №3. – с.23-27.
5. *Дикий М.О.* Підвищення ефективності ГПТУ «Водолій» охолодженням повітряного потоку в компресорі / М.О.Дикий, А.С.Соломаха, В.Г.Петренко // Наукові вісті НТУУ КПІ. – 2011. – №5. – с.31-34.
6. *Соломаха А.С.* Експериментальне дослідження розпилення перегрітої води / А.С.Соломаха // Східноєвропейський журнал передових технологій. – 2013. – №1/8 (61). – с.20-25.

-
7. Михайловский Г.А. Термодинамические расчеты процессов парогазовых смесей / Г.А. Михайловский. – Л., Машгиз, 1962. – 184 с.
 8. Дикий Н.А. Судовые газопаротурбинные установки / Н.А. Дикий– Л.: Судостроение, 1978. – 262 с.
 9. Хоблер Т. Теплопередача и теплообменники / Т. Хоблер. – Ленинград, 1961. – 820 с.
 10. Фукс Н.А. Испарение и рост капель в газовой среде / Н.А. Фукс. – Москва, 1958. – 91 с.
 11. Лыков М.В. Распылительные сушилки / М.В. Лыков, Б.И. Леончик – М.: Машиностроение, 1966. – 332 с.
 12. Лыков А.В. Теория сушки / А.В. Лыков. – М.: Энергия, 1968. – 472 с.
 13. Кремнев О.А. Скоростная сушка / О.А. Кремнев, В.Ф.Боровский, А.А.Долинский. – Киев, 1963. – 382 с.

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

ТЕПЛОМАССОБМЕН ПРИ ИСПАРЕНИИ КАПЕЛЬ ПЕРЕГРЕТОЙ ВОДЫ В ВОЗДУШНОМ ПОТОКЕ

В статье рассмотрены основные положения процесса охлаждения воздушного потока водой высокой температуры. Использование перегретой воды особенно привлекательно для реализации испарительного и промежуточного охлаждения циклового воздуха газотурбинного двигателя, так как в результате можно улучшить качество распыления и интенсифицировать теплообменные процессы.

Ключевые слова: испарительное охлаждение, перегретая вода.

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

HEAT-MASS EXCHANGE DURING SUPERHEATED WATER DROPS EVAPORATION IN AIR FLOW

The article considers main condition during air flow cooling by high-temperature water. Using superheated water is very attractive for cyclic air evaporation and intercooling in gas turbine engine. It helps to improve water atomization and to intensify heat-and-mass process.

Keywords: evaporation cooling, superheated water.

УДК 629.05

Доронін В.В.

ОСОБЛИВОСТІ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОЦІНЮВАННЯ ДІЯЛЬНОСТІ ОПЕРАТОРА ECDIS

Стаття присвячена актуальній проблемі точного теоретичного аналізу та критеріїв оцінки дій оператора при здійсненні рейсу з використанням ECDIS. Запропоновано способи і сформульовано головні принципи підходу до інформаційного опису і моделювання процедури безпосереднього і безперервного контролю за просуванням і місцем розташування судна з використанням ECDIS. Сформульовані розрізняюванні стани інформаційної моделі ECDIS. Отримані формули математичної моделі для їх безпосереднього використання для оцінки ступеня фактичного інформаційного навантаження реальних операторів ECDIS. У кінці статті наведені найбільш важливі прикладні результати проведеного дослідження.

Ключові слова: безпека судноплавства, навігація, управління, інформаційні потоки, стохастична система.