МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ КОРАБЛЕБУДУВАННЯ
імені адмірала Макарова

Ел Гербі Рамі Камел

УДК 621.438: 621.57

ОХОЛОДЖЕННЯ ПОВІТРЯ НА ВХОДІ ГАЗОТУРБІННИХ УСТАНОВОК ТЕРМОТРАНСФОРМАТОРАМИ В КЛІМАТИЧНИХ УМОВАХ ЛІВІЇ

Спеціальність 05.05.03
Двигуни та енергетичні установки

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Миколаїв 2014

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Національному університеті кораблебудування імені адмірала Макарова Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник – д-р техн. наук, професор **Радченко Микола Іванович**,
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, завідувач кафедри кондиціювання і рефрижерації

Офіційні опоненти:
д-р техн. наук, старший науковий співробітник **Білека Борис Дмитрович,**
Інститут технічної теплофізики НАН України,
завідувач лабораторії технологій комбінованого виробництва енергії;

канд. техн. наук, доцент **Петухов Ілля Іванович**,
Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського "Харківській авіаційний інститут" Міністерства освіти і науки України,
доцент кафедри аерокосмічної теплотехніки

Захист відбудеться "___" _____ 2014 р. о _____ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д38.060.01 Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова за адресою: 54025, м. Миколаїв, пр. Героїв Сталінграда, 9

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова за адресою: 54025, м. Миколаїв, пр. Героїв Сталінграда, 9

Автореферат розісланий "___" _____ 2014 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
д-р техн. наук, професор А.П. Шевцов

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність дослідження. Основу електроенергетичної галузі Лівії становлять газові турбогенератори, а виробництво електроенергії сконцентровано на електростанціях (ЕС) 6 регіонів. Через високі температури $t_{нв}$ навколишнього повітря на вході електрогенеруючих газотурбінних установок (ГТУ) їх ефективність різко знижується: питома витрата палива b_e зростає, а ефективна потужність N_e падає до 80 % номінальної. З метою зниження температури повітря на вході ГТУ теплоту відпрацьованих газів, потенціал якої для ГТУ, зокрема простого циклу, вельми високий, доцільно трансформувати в холод. Застосування в термотрансформаторах низькокиплячого робочого тіла (НРТ) дозволяє охолоджувати повітря в повітроохолоджувачах (ПО) на вході ГТУ до порівняно низьких температур, близьких 10 ºС, що забезпечувало б скорочення питомих витрат палива і стабільно ефективну експлуатацію ГТУ протягом року.

Підвищенню ефективності ГТУ присвячені праці М.О. Дикого, Б.Д. Білеки, В.М. Клименка, В.І. Романова, І.І. Петухова, J.N. Bortmany, M. Nixdorf, M. Chaker, R. Bhargava, C.B. Meher-Homji, S. Campanary, R. Yokoyama, K. Ito та інших відомих вчених. Ці питання є пріоритетними для організацій–розробників ГТУ на Україні (ДП НВКГ "Зоря"–"Машпроект", м. Миколаїв; "Мотор-Січ", м. Запоріжжя; Сумське ВО ім. Фрунзе). Ефективність охолодження повітря в енергетичних установках і комплексах, а також утилізації скидної теплоти досліджувалась провідними академічними інститутами, навчальними закладами та організаціями: ІТТФ НАНУ, НТУУ "КПІ" (м. Київ), НТУ "ХПІ", НАУ "ХАІ" (м. Харків), НУК, ПАТ "Завод "Екватор", ТОВ "Холодотехніка" (м. Миколаїв), ОНАХТ, ОНМА, ОНМУ (м. Одеса).

Незважаючи на численні дослідження різних способів охолодження повітря на вході ГТУ, у тому числі й трансформацією теплоти відхідних газів, лишаються невирішеними питання визначення раціональних типу та параметрів термотрансформаторів, зокрема холодильної потужності, температури холодоносія, від якої залежить глибина охолодження та отримуваний ефект, а також ефективності трансформації теплоти в умовах нерівномірного теплового навантаження на ПО по ходу повітря, що особливо різко проявляється при високих температурах повітря на вході, відповідно

й значному зниженні його температури в процесі охолодження. До того ж при великих витратах повітря, відповідно й довжинах труб у поперечному перерізі ПО в одних теплообмінних секціях має місце перегрів пари НРТ з украй низькою інтенсивністю тепловіддачі, а на виході з інших – пароріднна суміш. Вирішення цих питань забезпечувало б глибоке охолодження повітря на вході ГТУ, суттєве скорочення споживання палива та стабільну ефективну експлуатацію ГТУ упродовж року в кліматичних умовах регіонів Лівії, де розташовані ЕС.

Науково-прикладною задачею, яка вирішується в дисертаційній роботі, є підвищення ефективності охолодження повітря на вході ГТУ трансформацією теплоти відпрацьованих газів і визначення раціональних параметрів процесів охолодження, що забезпечують скорочення споживання палива при високих температурах повітря на вході.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Наведені в дисертації матеріали узагальнюють результати робіт, виконаних автором у рамках державної науково-технічної програми "Новітні та ресурсозберігаючі технології в енергетиці, промисловості та агропромисловому комплексі" і планів НДР Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, НДР № Д.Р. 0111U009084 "Системні дослідження та розробка моделей програмно-цільового розвитку систем теплопостачання України на основі новітніх технологій та процесів енергоперетворення", в яких автор брав участь як молодший науковий співробітник.

Об'єктом дослідження є процеси охолодження повітря на вході ГТУ простого циклу.

Предмет дослідження – параметри процесів охолодження повітря на вході ГТУ простого циклу трансформацією теплоти відпрацьованих газів, що забезпечують стабільно низькі температури повітря незалежно від кліматичних умов експлуатації.

Метою наукового дослідження є підвищення паливної ефективності ГТУ простого циклу шляхом охолодження повітря на вході трансформацією теплоти відпрацьованих газів.

Основні задачі наукового дослідження:

– виявити резерви підвищення паливної ефективності ГТУ простого циклу шляхом охолодження повітря на вході з

трансформацією теплоти відпрацьованих газів при експлуатації в умовах сухого тропічного клімату;

– розробити спосіб визначення раціонального типу й параметрів термотрансформатора, а також оцінки ефективності застосування охолодження повітря на вході ГТУ з урахуванням кліматичних умов експлуатації в різних регіонах Лівії;

– уточнити фізичну та математичну моделі процесів охолодження повітря на вході ГТУ в апаратах з фазовим переходом НРТ і трансформацією теплоти відпрацьованих газів при нерівномірному тепловому навантаженні, коли в одних теплообмінних секціях має місце перегрів пари НРТ з украй низькою інтенсивністю тепловіддачі, а на виході з інших – парорідинна суміш, підтвердити адекватність моделей;

– встановити особливості процесів охолодження повітря на вході ГТУ трансформацією теплоти відпрацьованих газів і уточнити принципи раціональної їх організації, що забезпечують інтенсивний теплообмін при нерівномірному тепловому навантаженні на апарати охолодження та високих температурах повітря на вході;

– визначити раціональні параметри охолодження повітря на вході ГТУ трансформацією теплоти відпрацьованих газів, що забезпечують скорочення споживання палива при високих температурах зовнішнього повітря, характерних для Лівії;

– розробити карту потенціалів охолодження повітря на вході ГТУ для регіонів Лівії, в яких сконцентроване виробництво електроенергії турбогенераторами, що дозволяло б підвищити паливну ефективність ГТУ за рахунок підтримання стабільно низької температури повітря на вході, визначати раціональний тип і параметри термотрансформатора.

Методика і методи дослідження. Методика визначення раціонального типу та теплового навантаження тепловикористовуючої установки охолодження повітря на вході ГТУ, а також оцінки ефективності охолодження повітря на вході ГТУ враховує кліматичні умови експлуатації і базується на понятті "потенціалу охолодження". Для розрахунку зміни температури та відносної вологості зовнішнього повітря на вході ГТУ протягом року в різних регіонах Лівії використана програма "mundomanz.com", доступна в режимі "on-line".

Наукові результати, які автор захищає, та їх **новизна**:

1. Отримали подальший розвиток принципи раціональної організації процесів охолодження повітря на вході ГТУ трансформацією теплоти відпрацьованих газів, які включають неповне випаровування НРТ у повітроохолоджувачах і забезпечують підвищення їх ефективності при нерівномірному тепловому навантаженні, зумовленому високими температурами повітря на вході, характерними для кліматичних умов Лівії, та підтримання стабільно низької температури повітря (7…10 °С) на вході ГТУ.

2. Розроблено спосіб визначення раціонального типу та параметрів термотрансформаторів для охолодження повітря на вході ГТУ, який базується на понятті "потенціалу охолодження" і враховує кліматичні умови експлуатації, дає змогу проводити оцінку ефективності їх застосування для охолодження повітря на вході ГТУ в різних регіонах Лівії.

3. Запропонований уточнений підхід до проектування теплообмінних апаратів охолодження повітря на вході ГТУ при експлуатації в умовах сухого тропічного клімату, згідно з яким розрахунок повітроохолоджувачів проводять, виходячи з теплового навантаження, якому відповідають значення сумарного річного потенціалу охолодження на 3…5 % менші максимальної величини за високих темпів його прирощення, а не з максимального теплового навантаження, як прийнято у практиці проектування.

4. Уточнені фізична та математична, що на ній базується, моделі процесів охолодження повітря на вході ГТУ в апаратах з фазовим переходом НРТ і трансформацією теплоти відпрацьованих газів, які дають змогу визначати локальні параметри процесів і виявляти їх особливості, пов’язані зі зміною теплового навантаження та його нерівномірним розподілом, зумовленими високими температурами повітря на вході, коли в одних теплообмінних секціях має місце перегрів пари НРТ з украй низькою інтенсивністю тепловіддачі, а на виході з інших – пароріднинна суміш.

5. Встановлені особливості процесів охолодження повітря на вході ГТУ трансформацією теплоти відпрацьованих газів, що полягають у зміні темпів прирощення сумарного потенціалу охолодження повітря на вході ГТУ, виходячи з чого визначають відповідні раціональні параметри процесів охолодження повітря, і передусім теплове навантаження термотрансформатора – на 20…30 % менше максимального, температуру холодоносія, яка

визначає глибину охолодження повітря, що забезпечує скорочення споживання палива ГТУ на 2…3 % в кліматичних умовах Лівії.

6. Визначені параметри раціональної організації процесів охолодження повітря на вході ГТУ трансформацією теплоти відпрацьованих газів, які забезпечують скорочення питомої витрати палива на 5…7 г/(кВт·год) та збільшення потужності ГТУ на 10…15 % при високих температурах навколишнього повітря, характерних для Лівії.

7. Розроблена карта потенціалів охолодження повітря на вході ГТУ для регіонів Лівії, в яких сконцентроване виробництво електроенергії, що дозволяє визначити раціональний тип термотрансформатора та його параметри, зменшити споживання палива та збільшити потужність ГТУ за рахунок зниження температури повітря на вході.

Достовірність результатів досліджень забезпечена використанням даних фірм-розробників ГТУ з питомої витрати палива та потужності, параметрів робочого тіла ГТУ (повітря, відпрацьованих газів), застосуванням для розрахунків зміни температури та відносної вологості зовнішнього повітря на вході ГТУ протягом року в різних регіонах Лівії програми "mundomanz.com", доступної в режимі "on-line", задовільним узгодженням результатів розрахунків за математичною моделлю з даними, отриманими при використанні програми фірми-виробника повітроохолоджувачів "Guntner".

Теоретичне значення мають наступні результати дослідження:

1. Отримали подальший розвиток принципи раціональної організації процесів охолодження повітря на вході ГТУ, які враховують вплив високих температур повітря на вході на розподіл теплового навантаження на поверхні повітроохолоджувачів, включають неповне випаровування та рециркуляцію НРТ в охолоджувачах, що забезпечує їх високу ефективність при нерівномірному тепловому навантаженні по ходу повітря.

2. Розроблено спосіб визначення раціонального типу та параметрів термотрансформаторів для охолодження повітря на вході ГТУ трансформацією теплоти відпрацьованих газів, який виходить з потенціалу охолодження і враховує кліматичні умови різних регіонів Лівії.

3. Запропонований уточнений підхід до проектування апаратів охолодження повітря на вході ГТУ в сухих тропічних умовах експлуатації, згідно з яким їх розрахунок проводять, виходячи з теплового навантаження, якому відповідають високі темпи прирощення сумарного річного потенціалу охолодження, а не з максимального, як прийнято у практиці проектування.

4. Уточнені фізична та математична моделі процесів охолодження повітря на вході ГТУ в апаратах з фазовим переходом НРТ і трансформацією теплоти відпрацьованих газів, які дають змогу визначати локальні параметри процесів, виходячи з яких виявляти особливості процесів охолодження, пов'язані зі зміною теплового навантаження та його нерівномірним розподілом, зумовленими високими температурами повітря на вході.

5. Виявлені особливості процесів охолодження повітря на вході ГТУ трансформацією теплоти відпрацьованих газів, що полягають у зміні темпів прирощення сумарного потенціалу охолодження повітря на вході ГТУ, виходячи з чого визначають відповідні раціональні параметри процесів охолодження повітря при експлуатації в умовах сухого тропічного клімату.

Практичну цінність становлять результати дослідження:

– раціональні параметри процесів охолодження повітря на вході ГТУ трансформацією теплоти відпрацьованих газів, які забезпечують скорочення питомої витрати палива на 5…7 г/(кВт·год) і збільшення потужності ГТУ (на 10…15 %) в кліматичних умовах Лівії;

– карта потенціалів охолодження повітря на вході ГТУ для регіонів Лівії, в яких сконцентровано виробництво електроенергії, що дозволяє оцінювати ефективність охолодження повітря, вибирати раціональні тип і встановлену потужність термотрансформатора, які забезпечують підтримання стабільно низької температури повітря на вході ГТУ (близько 10 °С);

– програма та методика розрахунку локальних параметрів процесів охолодження повітря на вході ГТУ з урахуванням зміни кліматичних умов експлуатації, рекомендації з визначення раціональних параметрів процесів.

Результати роботи (методики розрахунку раціональних параметрів процесів трансформації теплоти та охолодження повітря із застосуванням НРТ, конструктивних характеристик охолоджувачів; схеми систем утилізації та охолодження) використані

при проектуванні систем утилізації та установок охолодження, теплообмінного обладнання енергетичних комплексів: ПАТ "Завод "Екватор", ТОВ "Холодотехніка", (м. Миколаїв), у навчальному процесі Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова при виконанні магістерських робіт і дипломних проектів зі спеціальностей "Турбіни", "Газотурбінні установки компресорних станцій".

Апробація роботи. Основні результати отримали позитивну оцінку на міжнародних конференціях: XV–XVII міжнародних конгресах двигунобудівників; 1–3-й міжнародних науково-технічних конференціях "Інновації в суднобудуванні та океанотехніці" (Миколаїв: НУК, 2010–2013); V, VI міжнародних науково-технічних конференціях "Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні" (Миколаїв: НУК, 2010, 2012).

Публікації. По темі дисертації опубліковано 17 друкованих наукових праць, у тому числі 8 статей у наукових спеціалізованих виданнях (у наукометричних 2, у зарубіжних 1), 7 доповідей і тез (без співавторів 2).

Структура дисертації. Дисертація складається зі вступу, 5 розділів і висновків. У додатках наведені результати допоміжних розрахунків, документи, що підтверджують впровадження основних результатів дослідження.

Обсяг дисертації складає 171 сторінку основного машинописного тексту і 21 сторінку додатків, 76 рисунків і 6 таблиць. Бібліографія містить 127 найменувань на 11 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **першому розділі** досліджено проблеми електроенергетичної галузі Лівії, пов’язані з падінням ефективності електрогенеруючих ГТУ через високі температури повітря на вході: зростання витрат палива, зменшення потужності.

Оскільки в ГТУ простого циклу теплота відхідних газів вельми значна, то доцільна її трансформація в холод термотрансформаторами (ТТ), тобто тепловикористовуючими холодильними машинами (ТХМ), для охолодження повітря на вході ГТУ. В абсорбційних бромистолітієвих ТТ (АБТТ), в яких холодоносієм є вода з температурою t_x не нижче 7 ºС, охолодження

повітря можливе до 15 ºС, у водоаміачних (ВАТТ) і ежекторних (ЕТТ) на НРТ – до 10 ºС і нижче. Залежно від типу термотрансформатора (АБТТ, ВАТТ або ЕТТ) і кліматичних умов ефект від охолодження буде різний, а значні коливання температури $t_{нв}$ і відносної вологості φ навколишнього повітря протягом сезону, й особливо добові, ускладнюють вибір холодильної потужності ТТ (теплового навантаження) Q_0 для проектування передусім ПО на вході ГТУ.

Через нерівномірні теплові навантаження, зумовлені високими температурами повітря на вході, відповідно і їх градієнтами по ходу повітря в ПО, неможливо організувати процес випаровування НРТ у випарниках НРТ-повітроохолоджувачах (В-ПО) на вході ГТУ без перегріву пари НРТ, тобто з високою інтенсивністю тепловіддачі до киплячого НРТ. Для раціональної організації процесів фазового переходу НРТ з інтенсивною теплопередачею необхідно розраховувати локальні параметри киплячого НРТ і повітря. За результатами аналізу сформульовано мету і задачі наукового дослідження.

У **другому розділі** обґрунтовано напрям дослідження, пов'язаний з підвищенням паливної ефективності ГТУ шляхом охолодження повітря на вході трансформацією теплоти відпрацьованих газів. Значні сезонні та добові коливання температури $t_{нв}$ і відносної вологості φ навколишнього повітря, а відтак і теплового навантаження Q_0 на тепловикористовуючу установку охолодження повітря на вході ГТУ, вимагають такого підходу до дослідження процесів охолодження повітря на вході ГТУ та раціональної їх організації, який би враховував поточні змінні кліматичні умови, від яких залежить і ефект у вигляді економії палива. Застосована методика, що базується на понятті "потенціалу охолодження", який являє собою добуток зниження температури навколишнього повітря $\Delta t_в = t_{нв} - t_{в2}$ на вході ГТУ термотрансформатором і відповідного проміжку часу τ, тобто $П = \Delta t_в \tau$, ºС·год. Якщо τ = 1 год., то отримують поточний, погодинний, потенціал охолодження повітря на вході ГТУ, який співпадає з $\Delta t_в$, а сумуючи їх, – відповідні добовий, місячний і річний потенціали $П = \Sigma(\Delta t_в \tau)$, ºС·год. Дані з сумарних потенціалів охолодження $П = \Sigma(\Delta t_в \tau)$ повітря на вході ГТУ, а також зниження температури повітря Δt_{10} від поточної температури навколишнього повітря $t_{нв}$ до кінцевої

$t_{в2}$ = 10 ºС (ЕТТ або ВАТТ) та Δt_{15} – до $t_{в2}$ = 15 ºС (АБТТ) протягом липня 2009 р. (Тріполі) наведені на рис. 1.

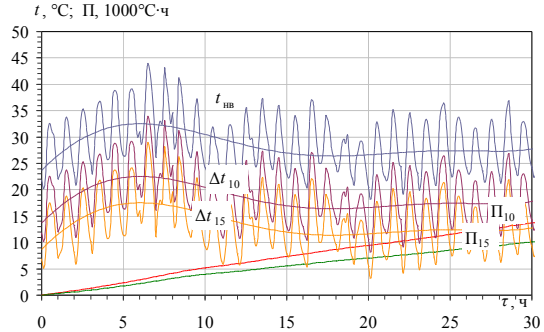
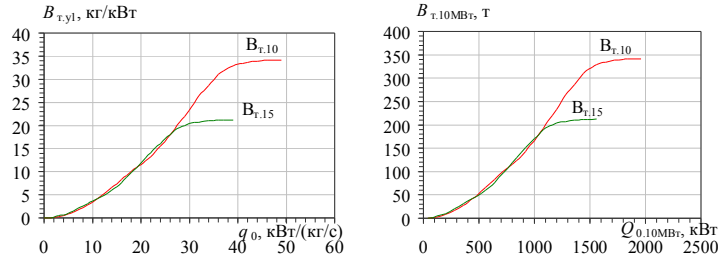


Рис. 1. Сумарні потенціали $П_{10}$ і $П_{15}$ охолодження повітря на вході ГТУ, зниження температури повітря Δt_{10} від $t_{нв}$ до $t_{в2}$ = 10 ºС в ЕХМ та Δt_{15} від $t_{нв}$ до $t_{в2}$ = 15 ºС в АБХМ

Як видно, сумарний за місяць потенціал охолодження повітря в ЕХМ у півтора рази більше ніж в АБХМ: $П_{10} >> П_{15}$. Знаючи потенціали охолодження П, розраховують економію палива $В_т$ для ГТУ за добу, місяць, рік. Для цього значення потенціалу охолодження П помножують на зниження питомої витрати палива при охолодженні повітря на вході ГТУ на 1 °С, тобто на $\Delta b_e / \Delta t$, г/(кВт·ч·°С), та на потужність ГТУ $N_{e.}$, кВт: $В_т = П (\Delta b_e / \Delta t) \cdot N_{e.кВт}$.

Залежності питомої, що припадає на 1 кВт електричної потужності ГТУ $N_{e.}$, річної економії палива $В_{т.у1} = В_т / N_e$, кг/кВт, отриманої як $В_{т.у1} = П (\Delta b_e / \Delta t)$, від питомих, що припадають на одиницю витрати повітря $G_в$ = 1 кг/с, витрат холодильної потужності $q_0 = \xi c_в (t_{нв} - t_{в2})$, кВт/(кг/с), при температурах охолодженого повітря $t_{в2}$ = 10 і 15 °С, та річної економії палива $В_{т.10МВт}$ для ГТУ $N_{e10МВт}$ = 10 МВт в залежності від витрат холодильної потужності Q_0 при температурах охолодженого повітря $t_{в2}$ = 10 і 15 °С для м. Тріполі за 2009 р. наведені на рис. 2. При цьому: $В_т = В_{т.у1} \cdot N_e$, приймали також $\Delta b_{e1°С} = \Delta b_e / \Delta t$ =·0,35 г/(кВт·год). Коефіцієнт вологовипадіння ξ – відношення повної кількості теплоти, відведеної від повітря (включно з теплотою конденсації водяної пари з вологого повітря), до явної теплоти, яка визначається різницею температур повітря на вході та виході з ПО: $\xi = (I_{в1} - I_{в2})/[c_в(t_{в1} - t_{в2})]$, де $I_{в1}$, $I_{в2}$ – ентальпія

повітря на вході та виході з В-ПО; $c_в$ – теплоємність вологого повітря.



а ***б***

Рис. 2. Залежності питомої (при $N_{e.}$ = 1 кВт) річної економії палива $B_{т.y1} = B_т / N_e$ від питомих (при $G_в$ = 1 кг/с) витрат холодильної потужності q_0 (***а***) та річної економії палива $B_{т.10МВт}$ для ГТУ $N_{e10МВт}$ = 10 МВт від витрат холодильної потужності $Q_{0.10МВт}$ (***б***):
$B_{т.10}$ – при $t_{в2}$ = 10 °С (ЕТТ або ВАТТ); $B_{т.15}$ – при $t_{в2}$ = 15 °С (АБТТ)

Як видно, річна економія палива $B_{т.10}$ при охолодженні повітря на вході ГТУ до $t_{в2}$ = 10 ºС (в ЕТТ або ВАТТ) майже у півтора рази більше ніж $B_{т.15}$ при $t_{в2}$ = 10 ºС (АБТТ). Через падіння темпів нарощування питомої річної економії палива $B_{т.10}$ після q_0 = 35 кВт/(кг/с) зростання $B_{т.10}$ не більше 3 %. То ж збереження високих темпів нарощування річної економії палива $B_{т.10}$ є умовою вибору раціональної встановленої холодильної потужності q_0 (відповідно й $Q_{0.10МВт}$). Інакше при завищеній q_0 буде мати місце експлуатація ТТ не на повну потужність і, відповідно, завищені капітальні витрати на ТТ, а при заниженій Q_0 , навпаки, – недоохолодження повітря на вході ГТУ при підвищених $t_{нв}$ і недоотримання економії палива $B_т$.

Таким чином, питому холодильну потужність термотрансформатора q_0 = 35 кВт/(кг/с) можна вважати раціональною і виходячи з неї вибирати повну встановлену холодильну потужність ТТ відповідно до витати повітря $G_в$ через ГТУ: $Q_0 = G_в \cdot q_0$, кВт, тобто вихідне теплове навантаження для розрахунку ПО на вході ГТУ.

Обґрунтовано методологічний підхід до підвищення ефективності ГТУ охолодженням повітря на вході ГТУ з утилізацією теплоти випускних газів і наведена загальна методика дослідження.

Третій розділ присвячено розробці математичної моделі процесів охолодження повітря на вході ГТУ в В-ПО, яка дає змогу визначати локальні параметри процесів, а відтак і ефективність роботи апаратів при змінних кліматичних умовах експлуатації. Розрахункова схема В-ПО з U -подібними трубками дана на рис. 3.

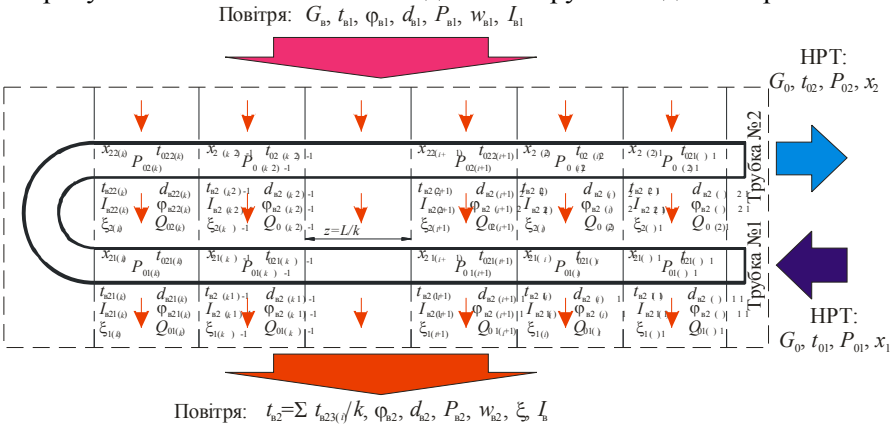


Рис. 3. Розрахункова схема випарника НРТ-повітроохолоджувача з U -подібними трубками: L − довжина прямої ділянки трубки у фронтальному перерізі; z − довжина i-ї ділянки; k − кількість ділянок довжиною z

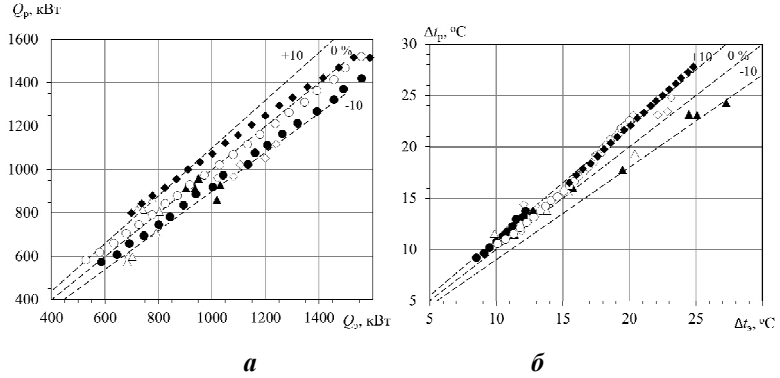
На кожному i-му кроці розраховують параметри повітря і НРТ (на виході з i-ї ділянки довжиною z). Температура повітря на виході з i-ї ділянки: $t_{вi+1} = t_{вi} - Q_i/(G_в \cdot \xi\ c_в)$; ентальпія $I_{в(i+1)} = I_{в(i+1)} - Q_i$. Відповідні параметри НРТ: тиск $P_{i+1} = P_i - \Delta P$, паровміст $x_{i+1} = x_i + \Delta x$; температура кипіння $t_{0i+1} = t_{0i} - \Delta t_0$; збільшення паровмісту НРТ Δx обчислюють з балансу теплоти, підведеної на i-й ділянці: $Q_i = k_i\ \theta_i\ \pi d_{вн}\ z\ = G_0\ r\ (x_{2i} - x_{1i})$; $\Delta x = (x_{2i} - x_{1i}) = k_i\ \theta_i\ \pi d_{вн}\ z\ /(G_0\ r)$, де θ_i.– середня логарифмічна різниця температур; r – теплота фазового перетворення; $d_{вн}$ – внутрішній діаметр трубки.

Коефіцієнти тепловіддачі при кипінні НРТ α_a і теплопередачі k обчислюють при поточному значенні паровмісту x. Градієнти тиску двофазового потоку (киплячого) НРТ визначали за моделлю Локкарта-Мартінеллі через їх величину для рідкої фази $(\Delta P/\Delta L)_р$: $(\Delta P/\Delta L) = \Phi_р^2 (\Delta P/\Delta L)_р$, де $\Phi_р$ – параметр Мартінеллі.

Теплове навантаження В-ПО $Q_0 = \Sigma Q_i$; питома холодопродуктивність (при витраті повітря $G_в$ = 1 кг/с): $q_0 = Q_0\ /G_в$.

Густина теплового потоку до внутрішньої поверхні труб В-ПО: $q_{Fa} = Q_0 /(\pi d_{вн} \Sigma z)$. Температура повітря на виході з В-ПО: $t_{в2} = \Sigma t_{в2i} / k_z$, де k_z число i-х ділянок прямої трубки. Кратність циркуляції НРТ у В-ПО: $n = 1/x_2$. Розглянуто конструктивні схеми В-ПО змійовикового типу, з U - і W-подібними трубками.

Адекватність математичної моделі процесів охолодження повітря встановлювали шляхом порівняння холодопродуктивності $Q_р$ та зниження температури повітря у В-ПО $\Delta t_р$, розрахованих за моделлю, та даних, отриманих за програмою фірми-розробника В-ПО "Guntner" $Q_э$ і $\Delta t_э$ (рис. 4).



а ***б***

Рис. 4. Порівняння даних з холодопродуктивності, розрахованих за моделлю $Q_р$ та програмою фірми-розробника В-ПО "Guntner" $Q_э$ (***а***), та зниження температури повітря у В-ПО $\Delta t_р$ і $\Delta t_э$ (***б***): $\Delta t = t_{в1} - t_{в2}$; ◊ – змійовик; Δ – U-подібні трубки; ▲ – W-подібні трубки

Як видно, відхилення значень $Q_р$ і $\Delta t_р$, розрахованих за моделлю, та за програмою фірми-розробника В-ПО "Guntner" $\Delta t_р$ і $\Delta t_э$ не перевищує 10…15 %, що свідчить про адекватність математичної моделі.

При проектуванні В-ПО з кипінням НРТ при великих витратах повітря, характерних для ГТУ, мають місце такі складнощі. У В-ПО з U - і W-подібними трубками нерівномірне теплове навантаження по ходу повітря спричиняє перегрів пари НРТ у перших трубках та неповне випаровування НРТ в останніх, що потребує відокремлення невипареної рідини від пари перед подачею останньої на всмоктування ежектора в ЕТТ. Падіння інтенсивності теплообміну при завершенні кипіння має місце й у змійовиковому В-ПО.

Зміна температури повітря $t_{в2}$, теплового навантаження Q, площі зовнішньої поверхні F, густини теплового потоку до внутрішньої поверхні q_{Fa} , аеродинамічного опору ΔP_1 , температури кипіння хладону t_{02} по глибині L та числу рядів $n_р$ прямих труб по глибині В-ПО наведена на рис. 5, а локальні значення коефіцієнтів тепловіддачі до НРТ α_a, повітря $\alpha_в$ і теплопередачі k , приведені до внутрішньої поверхні труб, по довжині L для U-подібних труб В-ПО – на рис. 6 (показано тільки перші шість U-подібних труб).

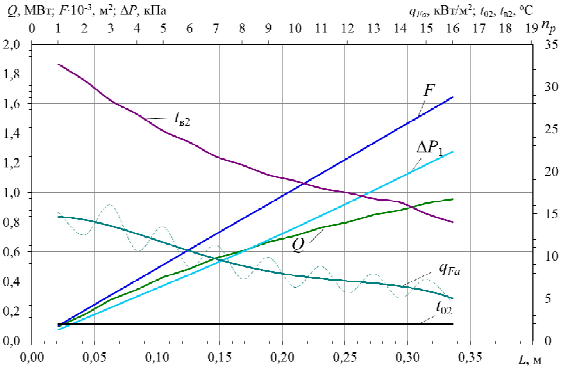


Рис. 5. Зміна температури повітря $t_{в2}$, теплового навантаження Q, площі зовнішньої поверхні F, густини теплового потоку до внутрішьої поверхні q_{Fa} , аеродинамічного опору ΔP_1 , температури кипіння хладону t_{02} по глибині L та числу рядів $n_р$ прямих труб по глибині В-ПО

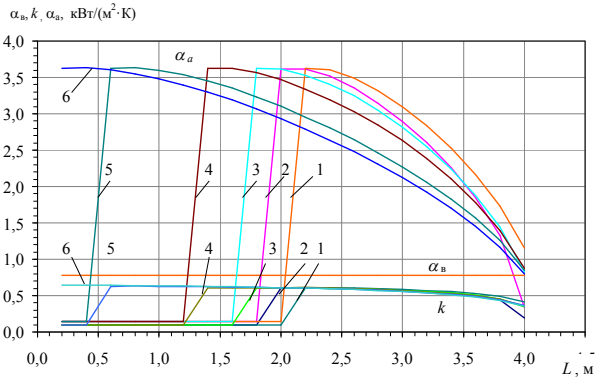
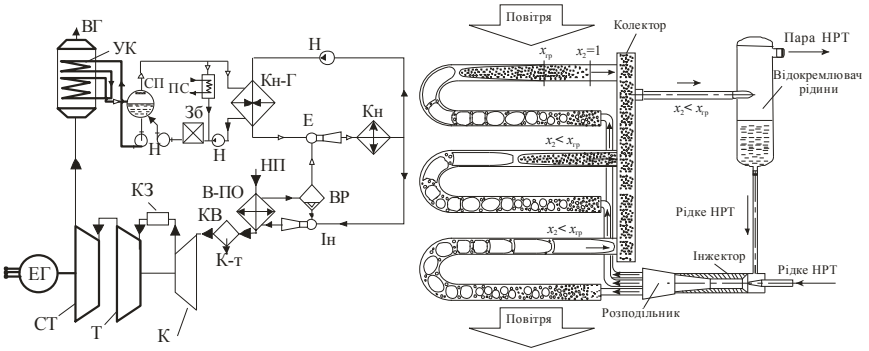


Рис. 6. Локальні значення коефіцієнтів тепловіддачі до НРТ α_a, повітря $\alpha_в$ і теплопередачі k , приведені до внутрішньої поверхні трубки, по довжині L U-подібних трубок В-ПО: 1…6 – номери U-подібних трубок

При цьому $t_{в1}$ = 35 °С і $\varphi_{в1}$ = 50 %, НРТ – хладон R142b; *U*-подібні трубки, довжина прямої трубки у фронтальному перерізі L_1 = 2 м; довжина *U*-подібної трубки $L_U = 2L_1 = 4$ м; загальна довжина *U*-подібних труб $L_{\Sigma U} = 16L_1 = 32$ м.

Задача – звести до мінімуму ділянки поверхні В-ПО з низькими коефіцієнтами тепловіддачі α_a до хладону R142b і теплопередачі k шляхом раціональної організації випаровування хладону R142b (без перегріву пари).

Четвертий розділ присвячено розробці способів раціональної організації процесів охолодження повітря на вході ГТУ трансформацією теплоти відпрацьованих газів та схемних рішень систем, які їх реалізують, встановленню особливостей процесів охолодження повітря та визначенню їх раціональних параметрів, що забезпечують підтримання стабільно низької температури повітря незалежно від кліматичних умов експлуатації. Схеми ГТУ з ЕТТ і рециркуляцією рідкого НРТ у В-ПО інжектором та інжекторно-випарникового вузла з *U*-подібними трубками і відокремлювачем рідини дано на рис. 7.



а ***б***

Рис. 7. Схеми ГТУ з ЕТТ (***а***) та інжекторно-випарникового вузла з *U*-подібними трубками (***б***): К – компресор ГТУ; Т – турбіна приводу компресора; СТ – силова турбіна приводу електрогенератора; ЕГ – електрогенератор; КЗ – камера згоряння; УК – утилізаційний котел; ВГ – відхідні гази; СП – сепаратор пари; Н – насос; ПС – пари споживачі; Зб – збірник конденсату; КО – краплевідокремлювач; К-т – конденсат; НП – навколишнє повітря; ЕТТ: Кн-Г – конденсатор водяної пари-генератор пари НРТ; Е– ежектор; Кн – конденсатор пари НРТ; Ін – інжектор; ВР – відокремлювач рідини; В-ПО – випарник НРТ-повітроохолоджувач

На рис. 8 наведено зміну температури повітря $t_{в2}$, теплового навантаження Q, площі зовнішньої поверхні F, густини теплового потоку до внутрішньої поверхні q_{Fa} , аеродинамічного опору ΔP_1 по глибині В-ПО L та числу рядів прямих труб по глибині $n_р$ з рециркуляцією НРТ в U-подібних трубках та без рециркуляції НРТ.

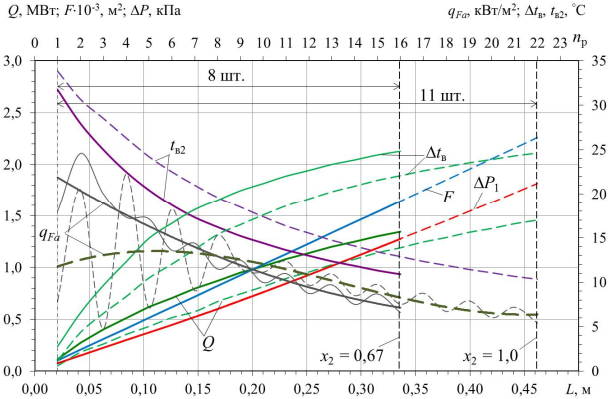


Рис. 8. Зміна температури повітря $t_{в2}$, теплового навантаження Q, площі зовнішньої поверхні F, густини теплового потоку до внутрішньої поверхні q_{Fa} , аеродинамічного опору ΔP_1 по глибині В-ПО L та числу рядів прямих труб по глибині $n_р$: —— – з рециркуляцією НРТ в U-подібних трубках;
- - - – без рециркуляції НРТ

При рециркуляції рідкого НРТ у В-ПО з U-подібними трубками має місце неповне випаровування (без дисперсного режиму та перегріву пари) з високими коефіцієнтами тепловіддачі α_a до киплячого НРТ і теплопередачі k , як трубки 6 на рис. 6, що забезпечує зменшення поверхні В-ПО на 6 рядів по глибині (по ходу повітря), тобто на 25 % порівняно з традиційними В-ПО без рециркуляції НРТ і з перегрівом пари (рис. 8).

Розроблені методика (рис. 2) та математична модель дають змогу визначити тип термотрансформатора (ЕТТ або АБТТ) та його встановлену холодильну потужність (холодопродуктивність), виходячи з неї, раціонально спроектувати В-ПО на вході ГТУ, а також оцінити ефект від охолодження повітря на вході ГТУ з урахуванням кліматичних умов експлуатації в регіонах, де розташовані газотурбінні електростанції (**п’ятий розділ).**

Річна економія палива $B_т$ за рахунок охолодження повітря на вході ГТУ до різних температур $t_{в2}$ залежно від типу термотрансформатора ($t_{в2}$ = 10 ºС в ЕТТ або ВАТТ; $t_{в2}$ = 15 ºС в АБТТ) для ГТУ потужністю N_e = 10 МВт для кожного з 6 регіонів та сумарна економія палива $B_т^р$ по регіонах (для всіх ГТУ регіону) наведені на рис. 9.

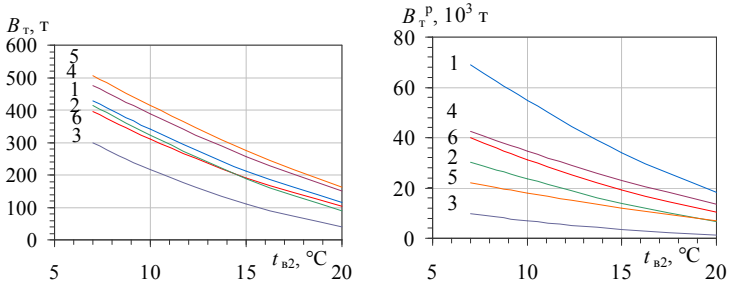


Рис. 9. Річна економія палива $B_т$ за рахунок охолодження повітря на вході ГТУ до різних температур $t_{в2}$ залежно від типу термотрансформатора ($t_{в2}$ = 10 ºС в ЕТТ або ВАТТ; $t_{в2}$ = 15 ºС в АБТТ) для ГТУ потужністю N_e = 10 МВт для кожного з 6 регіонів (***а***) та сумарна економія палива $B_т^р$ по регіонах для всіх ГТУ регіону (***б***)

Потужність N_e = 10 МВт прийнята для зручності перерахування на інші потужності. При цьому $B_т = П\,(\Delta b_e / \Delta t)\cdot N_{e.10МВт}$; $B_т^р = П\,(\Delta b_e / \Delta t)\Sigma N_e$; $\Delta b_e / \Delta t_в$ = 0,35 г/(кВт·год) – зменшення питомої витрати палива на 1 °С зниження температури повітря на вході ГТУ. Розподіл потужностей між регіонами: 1. Тріполі – 32 % загальної потужності ЕС, 1600 МВт; 2. Бенгазі – 15 %, 750 МВт; 3. Східний регіон (Шахат, Тубрак, Салун) – 6 %, 300 МВт; 4. Центральний (Хон, Сірт, Місрат) – 18 %, 900 МВт; 5. Південний (Джало, Саба, Кофра, Морзек) – 9 %, 450 МВт; 6. Західний регіон (Нелут, Завіа, Зентан) – 20 %, 1000 МВт.

Загальна річна економія палива $B_т^р$ для всіх газотурбоелектростанцій 6 регіонів при охолодженні повітря на вході ГТУ до температури $t_{в2}$ = 10 ºС (в ЕТТ або ВАТТ) становить 170 тис. т, а до $t_{в2}$ = 15 ºС (в АБТТ) – 105 тис. т. На зекономленому паливі можна виробити 700·ГВт·год електроенергії (при b_e = 240 г/(кВт·год), що рівнозначно введенню в експлуатацію ЕС потужністю 80 МВт.

Кліматична карта регіонів Лівії зі значеннями річних потенціалів П охолодження повітря, економії палива $B_т^р$ та додаткового виробництва електроенергії $\Sigma(\Delta N_{e\Sigma} \cdot \tau)^р$ завдяки охолодженню повітря на вході ГТУ наведена на рис. 10.

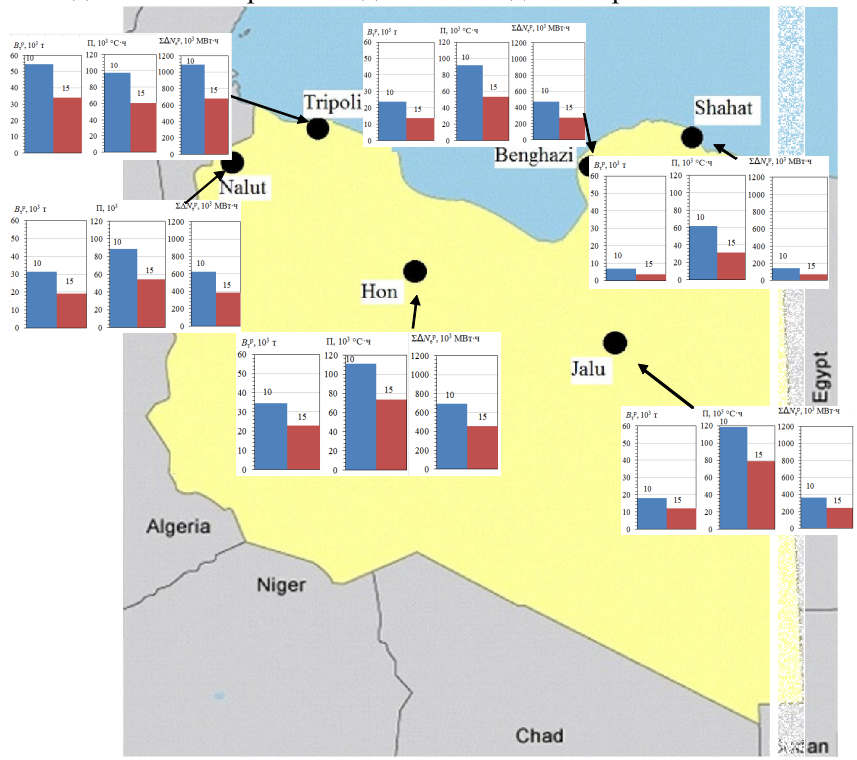


Рис. 10. Кліматична карта регіонів Лівії: П – річні потенціали охолодження повітря на вході ГТУ; $B_т^р$ – річна економія палива; $\Sigma(\Delta N_{e\Sigma} \cdot \tau)^р$ додаткове виробництво електроенергії завдяки охолодженню повітря на вході ГТУ

Результати обчислення терміну окупності установок охолодження повітря на вході для ГТУ простої схеми різної потужності N_e = 5…260 МВт трьох категорій: важких індустріальних ГТУ з температурою газів на вході в турбіну t_3 <1200 °С; вдосконалених високотемпературних індустріальних ГТУ з t_3>1200 °С; ГТУ авіаційного виконання показали, що терміни окупності установок охолодження повітря на вході ГТУ до

температури $t_{в2}$ = 10 ºС (ВАТТ або ЕТТ) близько 2 років, а до $t_{в2}$ = 15 ºС (АБТТ) – ледь більше 2 років.

ВИСНОВКИ

Вирішено науково-прикладну задачу підвищення ефективності охолодження повітря на вході ГТУ трансформацією теплоти відпрацьованих газів і визначення раціональних параметрів процесів охолодження, що забезпечують скорочення споживання палива при високих температурах повітря на вході.

1. Виявлені резерви підвищення паливної ефективності електрогенеруючих ГТУ простого циклу використанням теплоти відпрацьованих газів для охолодження повітря на вході в кліматичних умовах Лівії. Показано, що хоча наявного теплового потенціалу газів ГТУ простої схеми і достатньо для охолодження повітря на вході, проте традиційні способи трансформації тепла з повним випаровуванням НРТ в повітроохолоджувачах не забезпечують ефективної теплопередачі в умовах нерівномірного теплового навантаження на охолоджувачі по ходу повітря, оскільки має місце падіння інтенсивності випаровування НРТ при завершенні фазового переходу. Окрім того, традиційне проектування апаратів охолодження на максимальне теплове навантаження призводить до завищення потужності термотрансформаторів на 20…30 % в реальних умовах експлуатації зі змінною температурою повітря на вході упродовж доби, місяця, року.

2. Розроблено спосіб визначення раціонального типу та параметрів термотрансформатора для охолодження повітря на вході ГТУ, передусім холодильної потужності (холодопродуктивності) і температури холодоносія, який враховує поточні зниження температури повітря та їх тривалість упродовж року, дає змогу оцінювати ефективність охолодження повітря на вході ГТУ для кліматичних умов регіонів Лівії, де розташовані ЕС.

3. Запропонований та реалізований уточнений підхід до проектування охолоджувачів повітря на вході ГТУ для сухого тропічного клімату, згідно з яким їх розрахунок проводять на теплове навантаження термотрансформаторів на 20…30 % нижче максимального, чому відповідають значення потенціалу охолодження на 3…5 % менше сумарного річного потенціалу, а не на

максимальне теплове навантаження, як прийнято у практиці проектування.

4. Виявлені особливості процесів охолодження повітря на вході ГТУ трансформацією теплоти відпрацьованих газів, що полягають у більш пологому характері темпів приросщення завершальної частки сумарного потенціалу охолодження повітря по досягненні 95…97 % його максимальної величини, на яку припадає 20…30 % теплового навантаження термотрансформатора.

5. Уточнені принципи раціональної організації процесів охолодження повітря на вході ГТУ, які передбачають неповне випаровування та рециркуляцію НРТ у повітроохолоджувачах, що забезпечує їх високу ефективність при нерівномірному тепловому навантаженні по ходу повітря, враховують зростання впливу нерівномірного розподілу навантаження при високих температурах зовнішнього повітря та великих його витратах, характерних для ГТУ ЕС, коли в одних теплообмінних секціях має місце перегрів пари НРТ з украй низькою інтенсивністю тепловіддачі, а на виході з інших – парорідинна суміш.

6. Уточнені фізична та математична моделі процесів охолодження повітря на вході ГТУ в апаратах з фазовим переходом НРТ, які дають змогу розраховувати локальні параметри повітря і НРТ, виявити ділянки поверхні, на яких має місце їх погіршення (падіння інтенсивності кипіння НРТ і густини теплового потоку), викликане особливостями фазових переходів НРТ при великих витратах повітря та високих його температурах, характерних для кліматичних умов Лівії.

8. Для умов експлуатації з сухим тропічним кліматом визначені параметри раціональної організації процесів охолодження повітря на вході ГТУ трансформацією теплоти відпрацьованих газів (спосіб циркуляції НРТ, параметри НРТ і охолоджуваного повітря), які забезпечують підтримання порівняно низької температури повітря на вході ГТУ, скорочення питомої витрати палива на 5…7 г/(кВт·год) та збільшення потужності ГТУ на 10…15 %.

9. Складена кліматична карта для регіонів Лівії, де розташовані ЕС, що дозволяє оцінювати потенціал охолодження повітря на вході ГТУ та ефект від його реалізації, визначати раціональний тип і встановлену потужність термотрансформатора, які забезпечують зменшення витрати палива та збільшення виробництва електроенергії за рахунок підтримання температури повітря на вході

ГТУ близько 10 °С.

Основні результати дисертації опубліковані в наукових спеціалізованих виданнях:

1. Радченко, Н.И. Эффект от охлаждения воздуха на входе газотурбинных электростанций в разных регионах Ливии [Текст] / Н.И. Радченко, Рами Єл Герби // Авиационно-космическая техника и технология. – 2013. – № 1 (98). – С. 76–79. (науком.)

2. Радченко, Н.И. Выбор способа охлаждения воздуха на входе ГТУ в зависимости от региональных климатических условий. [Текст] / Н.И. Радченко, Рами Єл Герби // Авиационно-космическая техника и технология. – 2013. – № 2 (99). – С. 97–102. (науком.)

3. Радченко, Н.И. Анализ эффективности охлаждения воздуха на входе газотурбинных двигателей в жарких климатических условиях [Текст] / Н.И. Радченко, Рами Єл Герби, Рамзи Єл Герби // Газотурбинные технологии: Рыбинск, Россия. – 2013. – № 4 (115). – С. 34–39.

4. Радченко, Н.И. Охлаждение воздуха на входе газотурбинных двигателей использованием теплоты уходящих газов в климатических условиях Ливии [Текст] / Н.И. Радченко, Рами Єл Герби // Авиационно-космическая техника и технология. – 2011. – № 6(83). – С. 73–76.

5. Радченко, Н.И. Охлаждение наружного воздуха на входе ГТД теплоиспользующими холодильными машинами в условиях переменных температуры и влажности [Текст] / Н.И. Радченко, Рами Єл Герби // Авиационно-космическая техника и технология. – 2010. – № 9(76). – С.54–58.

6. Радченко, Н.И. Охлаждение воздуха на входе газотурбинных двигателей с учетом климатических условий Ливии [Текст] / Н.И. Радченко, Рами Єл Герби // Холодильна техніка та технологія. – 2012. – Вип. 4. – С. 258–263.

7. Радченко, Н.И. Региональные особенности применения теплоиспользующих систем охлаждения воздуха на входе электрогенерирующих газотурбинных установок в климатических условиях Ливии [Текст] / Н.И. Радченко, Рами Єл Герби // Наукові праці ОНАХТ. – Одеса: ОНАХТ. – 2011.– Вип.39. – Т.1. – С. 93–97.

8. Радченко, Н.И. Топливная эффективность охлаждения наружного воздуха на входе газотурбогенераторов в климатических условиях Ливии [Текст] / Н.И. Радченко, Рами Єл Герби // Зб. наук. праць ДонНУЕТ. – Донецьк: ДонНУЕТ. – 2012. – Вип. 29. – Т.2. – С.139–145

Основні публікації, в яких додатково викладено зміст дисертації:

9. Радченко, Н.И. Оценка эффективности охлаждения воздуха на входе газотурбинных двигателей в климатических условиях Ливии [Текст] / Н.И. Радченко, Рами Єл Герби, Рамзи Єл Герби // Інновації в

суднобудуванні та океанотехніці: Матеріали IV м.-н. н.-т. конф. – Миколаїв: НУК, 2013. – С. 250–255.

10. Радченко, Н.И. Оценка топливной эффективности предварительного охлаждения воздуха газотурбинных двигателей в климатических условиях Ливии [Текст] / Н.И. Радченко, Рамзи Єл Герби, Рами Єл Герби // Холод в енергетиці і на транспорті: сучасні проблеми кондиціонування та рефрижерації: Матеріали II м.-н. н.-т. конф. – Миколаїв: НУК, 2013. Ч. 1 – С. 137–142.

11. Радченко, Н.И. Предварительное охлаждение циклового воздуха газовых турбин теплоиспользующими холодильными машинами в условиях переменных влажности и температуры наружного воздуха [Текст] / Н.И. Радченко, Рами Єл Герби, Рамзи Єл Герби // Холод в енергетиці і на транспорті: сучасні проблеми кондиціонування та рефрижерації: Матеріали II м.-н. н.-т. конф. – Миколаїв: НУК, 2013. – Ч. 1 – С. 232–238.

12. Радченко, Н.И. Топливная эффективность предварительного охлаждения циклового воздуха газотурбинных двигателей в климатических условиях Ливии [Текст] / Н.И. Радченко, Рами Єл Герби, Рамзи Єл Герби // Холод в енергетиці і на транспорті: сучасні проблеми кондиціонування та рефрижерації: Матеріали II м.-н. н.-т. конф. – Миколаїв: НУК, 2013. – Ч. 2 – С. 30–40.

13. Эл Герби, Рами. Особенности применения теплоиспользующих систем охлаждения воздуха когенерационных установок в климатических условиях Ливии [Текст] / Рами Єл Герби // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: Матеріали м.-н. н.-т. конф.-Миколаїв: НУК, 2010. – С. 253–254.

14. Радченко, Н.И. Региональные особенности применения теплоиспользующих систем охлаждения воздуха на входе электрогенерирующих газотурбинных установок в климатических условиях Ливии [Текст] / Н.И. Радченко, Рами Єл Герби // Современные проблемы холодильной техники и технологи: Тезисы докладов м.-н. н.-т. конф. – Одесса: ОНАПТ, 2011. – С. 62–64.

15. Эл Герби, Рами. Проблемы получения электроэнергии в газотурбинных установках при высоких температурах наружного воздуха [Текст] / Рами Єл Герби // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: Матеріали м.-н. н.-т. конф.-Миколаїв: НУК, 2011. – С. 322–326.

16. Радченко, Н.И. Утилизационная система предварительного охлаждения воздуха газотурбинной установки в климатических условиях Ливии [Текст] / Н.И. Радченко, Рами Єльгерби // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: Матеріали м.-н. н.-т. конф.-Миколаїв: НУК, 2011. – С. 375–379.

17. Радченко, Н.И. Предварительное охлаждение циклового воздуха газотурбинных двигателей в климатических условиях Ливии [Текст] /

Н.И. Радченко, Рами Єл Герби // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: Матеріали III м.-н. н.-т. конф.-Миколаїв: НУК, 2012. – С. 436–438

Особистий внесок здобувача у праці, що опубліковані у співавторстві: [1, 3, 6, 17] – результати оцінки паливної ефективності ГТУ з охолодженням повітря на вході; [2, 4, 9, 12, 1] – особливості процесів охолодження повітря трансформацією теплоти випускних газів ГТУ, методика і результати розрахунку раціональних типу і характеристик ежекторних термотрансформаторів для охолодження повітря на вході ГТУ; [5, 7, 10, 14] – результати аналізу кліматичних умов для термотрансформаторів охолодження повітря на вході ГТУ; [16] – дані з поточних параметрів процесів охолодження повітря на вході ГТУ в регіонах Лівії; [8, 11] – дані статистичної обробки кліматичних характеристик ГТУ.

АНОТАЦІЯ

Ел Гербі Р.К. Охолодження повітря на вході газотурбінних установок термотрансформаторами в кліматичних умовах Лівії. − Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.03 – Двигуни та енергетичні установки. – Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, 2014.

Дисертація присвячена підвищенню паливної ефективності газотурбінних установок (ГТУ) простого циклу шляхом використання теплоти випускних газів термотрансформаторами для охолодження повітря на вході. Розроблена математична модель процесів охолодження повітря на вході ГТУ з випаровуванням низькокиплячих робочих тіл (НРТ) в змійовиках, U- та W-подібних трубах повітроохолоджувачів, що враховує нерівномірний розподіл теплового навантаження уздовж повітряного потоку, яке призводить до перегріву пари НРТ з низькою інтенсивністю теплообміну в одних трубах і неповного випаровування НРТ з високою інтенсивністю теплообміну в інших. Математична модель дозволяє розраховувати локальні параметри НРТ і повітря та раціонально організовувати процеси випаровування НРТ з високою інтенсивністю теплообміну в усіх трубах. Для вибору типу та раціональних параметрів термотрансформаторів відповідно до кліматичних умов використаний метод оцінки потенціалу охолодження повітря на вході ГТУ. Виконана оцінка економії палива за рахунок охолодження повітря на вході ГТУ в регіонах Лівії, де сконцентроване виробництво електроенергії турбогенераторами.

Ключові слова: газотурбінна установка, витрата палива, охолодження повітря, випускний газ, утилізація теплоти, кліматичні умови.

АННОТАЦИЯ

Эл Герби Р.К. Охлаждение воздуха на входе газотурбинных установок термотрансформаторами в климатических условиях Ливии. − Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.05.03 – Двигатели и энергетические установки. – Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, Николаев, 2014.

Диссертация посвящена повышению топливной эффективности газотурбинных установок (ГТУ) простого цикла путем использования теплоты выпускных газов термотрансформаторами для охлаждения воздуха на входе. Разработана математическая модель процессов охлаждения воздуха на входе ГТУ с испарением низкокипящих рабочих тел (НРТ) в змеевиках, U- и W-образных трубах воздухоохладителей, учитывающая неравномерное распределение тепловой нагрузки вдоль воздушного потока, которое приводит к перегреву паров НРТ с низкой интенсивностью теплообмена в одних трубах и неполному испарению НРТ с высокой интенсивностью теплообмена в других. Математическая модель позволяет рассчитывать локальные параметры НРТ и воздуха и рационально организовать процессы испарения НРТ с высокой интенсивностью теплообмена во всех трубках. Для выбора типа и рациональных параметров термотрансформаторов в соответствии с климатическими условиями использован метод оценки потенциала охлаждения воздуха на входе ГТУ. Выполнена оценка экономии топлива за счет охлаждения воздуха на входе ГТУ в регионах Ливии, где сконцентрировано производство электроэнергии турбогенераторами.

Ключевые слова: газотурбинная установка, расход топлива, охлаждение воздуха, выпускной газ, утилизация теплоты, климатические условия.

SUMMARY

El Gerbi R.K. Cooling of the air at the inlet of gas turbine unites by thermotransformers in climate conditions of Libya. − Manuscript.

The dissertation for the scientific degree of the candidate of technical sciences on speciality 05.05.03 – Engines and power plants.– National University of Shipbuilding named after admiral Makarov, Mikolayiv, 2014.

The dissertation is devoted to increasing the fuel efficiency of gas turbine unites (GTU) of a simple cycle by using the heat of exhaust gases in the thermotransformers to cool the intake air. A mathematical model of cooling processes of the air at the inlet of GTU with evaporation of low boiling working fluids (LBWF) in coils, U- and W-types of the air cooler tubes has been

developed that takes into account the unequal heat load distribution along the air stream leading to superheating of LBWF vapours with low intensity of heat transfer in ones tubes and non-full evaporation of LBWF with high intensity of heat transfer in others. The mathematical model allows to calculate local parameters of LBWF and air and to organize the processes of evaporation of LBWF rationally with high intensity of heat transfer in all tubes. The method of GTU intake air cooling potential estimation was used to choose the type and rational parameters of thermotransformers according to climatic conditions. A fuel saving due to cooling of the air at the inlet of GTU in regions of Libya where electricity production in turbogenerators concentrated has been evaluated.

Key words: gas turbine unit, fuel consumption, cooling of air, exhaust gas, waste heat recovery, climatic conditions.