

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

ЗУБАРЕВ АНАТОЛІЙ АНАТОЛІЙОВИЧ



УДК 621.574

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ОХОЛОДЖЕННЯ ПОВІТРЯ
ГАЗОВИХ ДВИГУНІВ БРОМИСТОЛІТІЄВОЮ ХОЛОДИЛЬНОЮ
МАШИНОЮ**

Спеціальність 05.05.14 – Холодильна, вакуумна та компресорна техніка,
системи кондиціювання

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Одеса – 2021

Дисертацією є рукопис.

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

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент
Трушляков Євген Іванович,
ректор Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова МОН України

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Тітлов Олександр Сергійович,
завідувач кафедри теплоенергетики та трубопровідного транспорту енергоносіїв Одеської національної академії харчових технологій МОН України,

доктор технічних наук,
старший науковий співробітник
Тарасова Вікторія Олександрівна,
Інститут проблем машинобудування
імені А.М. Підгорного Національної академії наук
України, відділ моделювання та ідентифікації теплових процесів.

Захист дисертації відбудеться «14» вересня 2021 р. об 12-30 годині в ауд. 108 на засіданні спеціалізованої вченої ради Д41.088.03 в Одеській національній академії харчових технологій за адресою: вул. Дворянська, 1/3, м. Одеса, 65082, Україна.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Одеської національної академії харчових технологій за адресою: вул. Дворянська, 1/3, м. Одеса, 65082, Україна.

Автореферат розіслано «13» серпня 2021р.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради Д41.088.03,
доктор технічних наук, професор



В.І. Мілованов

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Газові двигуни (ГД) набули широкого поширення в установках автономного енергопостачання (УАЕ) – електро-, тепло- та холодопостачання підприємств, зокрема переробної харчової промисловості, готельних, торгівельних та інших комплексів. Завдяки використанню теплоти двигунів безпосередньо в опалювальний сезон та трансформованої в холод – в технологічних процесах або системах кондиціювання, коефіцієнт використання таких установок практично подвоюється порівняно з установками когенераційного типу сумісного виробництва електричної енергії та теплоти.

При цьому теплота, відведена від ГД у вигляді гарячої води, трансформується в холод тепловикористовуючими, як правило, абсорбційними бромистолітєвими холодильними машинами (АБХМ), а отриманий холод використовується передусім на технологічні потреби. Паливна економічність ГД істотно залежить від температури повітря на вході ГД та наддувного стисненого повітря на вході в робочі циліндри і знижується з її підвищенням, що потребує його охолодження. Проте при підвищених температурах зовнішнього повітря і, відповідно, на вході ГД та технологічних потребах має місце дефіцит холоду, який зазвичай покривається парокомпресорними холодильними машинами з витратою дефіцитної електроенергії, що не дає можливості підтримувати стабільно низьку температуру повітря ГД і вимагає пошуку додаткових джерел теплоти та способів її перетворення в холод.

Ефективність перетворення теплоти гарячої води в холод в АБХМ простої схеми висока (високий коефіцієнт перетворення), якщо зниження її температури не більше за 10...15 °С. При температурі гарячої на вході АБХМ (виході з ГД) 90 °С її температура на виході з АБХМ має бути не нижче 75 °С. Оскільки зворотна вода після АБХМ є водночас охолоджувальною для ГД, то її температура на вході ГД не повинна бути вище 70 °С для підтримання термічного стану ГД на безпечному рівні. Для підтримання температури зворотної води на вході ГД на рівні 70 °С вона додатково охолоджується в радіаторі "аварійного скидання". Це призводить до значних втрат зворотної теплоти близько 30 %. До того ж, отримання додаткової холодопродуктивності вкрай необхідне для охолодження повітря ГД з метою забезпечення стабільно високої паливної економічності двигунів при підвищених температурах зовнішнього повітря.

Отриманню холоду шляхом перетворення теплоти двигунів присвячені роботи В.С. Мартиновського, Ю.В. Захарова, С.З. Жадана, Б.І. Баска, Л.І. Морозюк, Б.Д. Білеки, С.Й. Ткаченка, М.І. Радченка, М.Г. Хмельнюка, О.С. Тітлова, В.С. Тарасової, S. Campanary, M. Carvalho, інших відомих учених. Однак питання зменшення втрат теплоти при її перетворенні в АБХМ та використання отриманого холоду для охолодження повітря ГД потребують подальшого вирішення.

Науково-прикладною задачею, що вирішується в дисертаційній роботі, є розробка систем охолодження повітря газових двигунів з використанням зворотної теплоти, що лишається після її перетворення в АБХМ, шляхом глибокої утилізації ежекторною холодильною машиною (ЕХМ) у єдиному ланцюгу "утилізація в ЕХМ зворотної теплоти після АБХМ – охолодження повітря газового двигуна".

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Наведені в дисе-

ртації матеріали узагальнюють результати робіт, виконаних автором у рамках державної науково-технічної програми "Новітні та ресурсозберігаючі технології в енергетиці, промисловості та агропромисловому комплексі", НДР № 0115U000300 "Науково-технічні основи тригенераційних полінарних технологій на низькокиплячих робочих тілах для двигунів і енергетичних установок", № ДР 0121U112132 "Науково-технічні основи енергожиттєзабезпечення суден морського флоту та кораблів берегової охорони", № М/108-2019 "Підвищення ефективності енергетичних установок шляхом використання термоакустичних технологій". Університет науки і технологій Цзянсу (Jiangsu University of Science and Technology), м. Чженьцзян, Китай, Міністерство освіти і науки України (фінансування спільних україно-китайських науково-дослідних проектів), в яких автор брав участь як виконавець на посаді наукового співробітника.

Метою наукового дослідження є підвищення ефективності охолодження повітря ГД з використанням теплоти, що лишається після її перетворення в холод в АБХМ, шляхом її глибокої утилізації ежекторною холодильною машиною (ЕХМ).

Основні задачі наукового дослідження:

– виявити резерви теплоти зворотного теплоносія після її перетворення в холод в АБХМ, яка зазвичай скидається у довкілля, та реалізувати їх шляхом глибокої утилізації для охолодження повітря ГД;

– розробити вдосконалену математичну модель процесів охолодження повітря ГД з використанням зворотної теплоти в ЕХМ, підтвердити адекватність моделі даними моніторингу параметрів процесів охолодження повітря ГД та утилізації теплоти;

– розробити способи раціональної організації процесів охолодження повітря ГД з використанням холоду, отриманого шляхом глибокої утилізації відведеної теплоти в ЕХМ, та системи охолодження, що їх реалізують.

Об'єктом дослідження є системи охолодження повітря ГД шляхом утилізації відведеної теплоти.

Предмет дослідження – процеси охолодження повітря ГД шляхом утилізації теплоти ежекторною холодильною машиною (ЕХМ).

Методи дослідження. Натурні випробування та моделювання процесів охолодження повітря ГД утилізацією відведеної теплоти в ЕХМ проведено з використанням методів фізичного та математичного моделювання. Раціональні параметри процесів трансформації скидної теплоти ГД в холод обчислювали за розробленою програмою розрахунку характеристик (холодопродуктивності, теплових коефіцієнтів тощо) системи трансформації теплоти в АБХМ і ЕХМ з використанням даних фірм-розробників. Адекватність результатів математичного моделювання процесів охолодження повітря й утилізації теплоти підтверджено даними моніторингу.

Наукові результати, які автор захищає, та їхня новизна:

1. Вперше науково-прикладна задача підвищення ефективності охолодження повітря ГД вирішується за принципово нового підходу з використанням теплоти, що лишається після її перетворення в холод в АБХМ і сягає 30...40 %, шляхом її глибокої утилізації в ЕХМ у єдиному ланцюгу "утилізація зворотної теплоти після АБХМ в ЕХМ– охолодження повітря ГД".

2. Розроблено вдосконалену математичну модель процесів охолодження повітря

ГД шляхом використання в ЕХМ теплового потенціалу зворотного теплового потоку після АБХМ, яка дає можливість визначати характеристики (холодопродуктивність, теплові коефіцієнти) і параметри процесів, що забезпечують стабілізацію температури повітря двигунів за змінних теплових навантажень відповідно до поточних кліматичних умов. Адекватність моделі підтверджено даними моніторингу підсистем охолодження повітря ГД та утилізації теплоти.

3. Розроблено способи раціональної організації процесів охолодження повітря ГД за сумісного використання холодопродуктивності градирні мокрого типу та холодопродуктивності, отриманої трансформацією теплоти зворотного теплоносія, що забезпечують стабільно низьку температуру повітря і, як наслідок, зменшення споживання палива на 2...3 %.

4. Запропоновані новий підхід до охолодження повітря ГД утилізацією зворотної теплоти, що лишається після АБХМ в ЕХМ, розроблені способи раціональної організації процесів охолодження й утилізації та схемні рішення систем з їх реалізації складають науково-технічне підґрунтя створення систем охолодження повітря ГД, незалежних від режимів навантаження технологічних споживачів холоду.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій забезпечено обґрунтованою постановкою завдань теоретичного й експериментального досліджень, підтвердженням адекватності математичної моделі даними моніторингу із задовільним узгодженням розрахункових і експериментальних даних, застосуванням сучасних методів експериментального дослідження та чисельного моделювання.

Практичну цінність становлять розроблена система комплексного тепловикористання, що складається з підсистем охолодження повітря ГД та глибокої утилізації зворотної теплоти після АБХМ в ЕХМ, є незалежною від режимів навантаження технологічних споживачів холоду та забезпечує високу паливну ефективність ГД, методика визначення тепло- та холодопродуктивності з урахуванням змінних теплових навантажень системи охолодження повітря ГД відповідно до кліматичних умов.

Впровадження результатів досліджень.

Результати дослідження у вигляді схемних рішень систем охолодження повітря на вході ГД та утилізації теплоти; методики розрахунку параметрів і рекомендації з проектування систем використані в ТОВ "Хладотехніка" при розробці проекту холодопостачання установки автономного енергозабезпечення для ТОВ "Сандора", у ПАТ "Завод" Екватор" при проектуванні та виготовленні систем охолодження і теплообмінного обладнання, а також у навчальному процесі НУК імені адмірала Макарова.

Особистий внесок здобувача полягає у новому підході до підвищення ефективності охолодження повітря ГД використанням теплоти, що лишається після її перетворення в холод в АБХМ, шляхом її глибокої утилізації в ЕХМ у єдиному ланцюгу "утилізація зворотної теплоти після АБХМ в ЕХМ– охолодження повітря ГД"; підвищенні паливної ефективності ГД завдяки охолодженню повітря, з одного боку, та підтриманні теплового стану ГД на безпечному рівні, з іншого; визначенні раціональних параметрів процесів, що забезпечують стабілізацію температури повітря ГД.

Апробація і повнота викладення результатів роботи у публікаціях. Основні наукові та практичні результати дисертаційного дослідження одержали позитивну

оцінку на міжнародних конференціях: "Сучасні проблеми холодильної техніки і технології" (Одеса, 2011, 2015, 2017); "Холод в енергетиці і на транспорті: сучасні проблеми кондиціонування та рефрижерації" (Миколаїв, 2008, 2013, 2015, 2017); VI-XXI Міжнародних конгресів двигунобудівників (Харків- Коблево, 2003-2018); "Суднова енергетика: стан та проблеми" (Миколаїв, 2005, 2009, 2013, 2017); "Інновації в суднобудуванні та океанотехніці" (Миколаїв, 2010 – 2020), VII, VIII конференціях "Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні" (Миколаїв: НУК, 2014, 2016); "International Symposium on Heat Transfer and Renewable Sources of Energy: HTRSE" (Szczecin, Poland, 2018); "Contemporary Issues of Heat and Mass Transfer" (Koszalin, Poland, 2019); Международная научно-практическая конференция FS-2019: Матеріали. Одесса – Стамбул, 2019); The 5th "International Conference on Systems and Informatics: ICSAI 2018", Jiangsu, Nanjing, China; "Heat Pipes, Heat pumps, Refrigerators, Power sources" (Мінськ, Біларусь, 2018)); Kazakhstan-Refrigeration 2020: Proceeding sof the Conference (March 4-5, 2020))

Публікації. За темою дисертації опубліковані 49 друкованих наукових робіт, в тому числі 6 статей у виданнях, що входять до наукометричної бази Scopus та Web of Science, 10 статей у наукових фахових виданнях України, 1 розділ у колективній монографії закордонного видавництва, 32 доповіді і тез доповідей на міжнародних наукових конференціях.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, 5 розділів і висновків. У додатках містяться документи, що підтверджують впровадження основних результатів дослідження. Обсяг дисертації становить 161 сторінку, включаючи 137 сторінок основного тексту, 58 рисунків і 12 таблиць. Бібліографія містить 126 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми, сформульовано об'єкт і предмет дослідження, мету і головні завдання дисертаційної роботи, визначено наукову новизну, теоретичне та практичне значення отриманих результатів, відображено повноту їхнього викладення в публікаціях та ступінь їхньої апробації на конференціях.

У першому розділі проаналізовано існуючі системи охолодження повітря двигунів установок автономного енергопостачання (УАЕ) та утилізації скидної теплоти. Показано, що найбільшого поширення набули УАЕ з привідними газовими двигунами (ГД) та системи утилізації на базі абсорбційних бромистолітієвих холодильних машин (АБХМ), а отриманий холод використовується для технологічних потреб або кондиціонування повітря приміщень тощо. При підвищених температурах зовнішнього повітря і, відповідно, на вході ГД та технологічних потребах має місце дефіцит холоду, який зазвичай покривається парокомпресорними холодильними машинами (ПКХМ) з витратою дефіцитної електроенергії, що не дає можливості підтримувати стабільно низьку температуру повітря ГД і вимагає пошуку додаткових джерел теплоти та способів її перетворення в холод. До таких джерел перш за все треба віднести втрати теплоти зворотного теплоносія (води) після АБХМ, який водночас є охолоджувальним для ГД. Для підтримання термічного стану ГД на безпечному рівні температура зворотної води на вході ГД повинна бути не вище, тому вона додатково охолоджується в радіаторі "аварійного скидання". Це призводить до значних втрат

зворотної теплоти, які становлять близько 30 % від загальної її кількості, відведеної від ГД.

За результатами аналізу сформульовано мету і задачі наукового дослідження.

У **другому розділі** виконано аналіз енергетичних втрат при трансформації теплоти ГД в холод для типової установки автономного енергозабезпечення технологічного призначення, як приклад, з двох ГД JMS 420 GS фірми "GE-Jenbacher" (специфікаційні електрична потужність 1400 кВт і теплова потужність 1500 кВт кожного) та АБХМ AR-D500L2 Century (холодопродуктивність 2000 кВт) (рис. 1).

Питома витрата палива газових двигунів, як і всіх теплових двигунів, збільшується з ростом температури повітря на всмоктуванні турбокомпресора (ТК) і наддувної газоповітряної суміші (ГПС) на вході в циліндри двигуна. У традиційних системах відведення теплоти від наддувного повітря в навколишнє середовище відбувається за допомогою радіатора замкненого контуру водяного охолодження низькотемпературного ступеня охолоджувача наддувної суміші ОНС_{НТ}.



а



б

Рис. 1. Газовий двигун з утилізаційним котлом (нижній горизонтальний теплообмінник ліворуч) і двоступеневим охолоджувачем наддувного повітря (а), центральний кондиціонер охолодження припливного повітря машинного відділення ГД (б) з використанням як холодоносія холодної води від АБХМ

Принципова схема типової системи охолодження припливного повітря машинного відділення та охолодження наддувного повітря радіатором наведена на рис. 2.

Теплота, відведена від випускних газів, наддувного повітря, мастила і охолоджувальної води корпусу (сорочки) ГД JMS 420 GS ГД, використовується для нагріву води як теплоносія для АБХМ.

Ефективність радіаторної системи охолодження різко падає з ростом температури зовнішнього повітря на вході радіатора вище 25...30 °С, коли стає неможливим охолодження наддувної ГПС до температури 40-45 °С. Для захисту ГД від негативного впливу високої температури наддувної ГПС на термічний стан циліндро-поршневої групи температуру наддувної ГПС підтримують автоматично близько 40 °С, зменшуючи подачу газу і, відповідно, навантаження на двигун.

Якщо температура наддувної ГПС перевищує її граничне значення 50 °С, ККД

двигуна різко падає. При високій температурі зовнішнього повітря на вході радіатора, коли температура наддувної ГПС перевищує граничне значення 50°C , двигун переходить на режим часткового навантаження, що призводить до збільшення питомої витрати газоподібного палива у порівнянні з режимом номінального навантаження. Тому для роботи газового двигуна на номінальному або близькому до номінального навантаження необхідне більш глибоке зниження температури охолоджуючої води на вході низькотемпературного ступеня охолоджувача наддувної суміші $\text{ОНС}_{\text{НТ}}$.

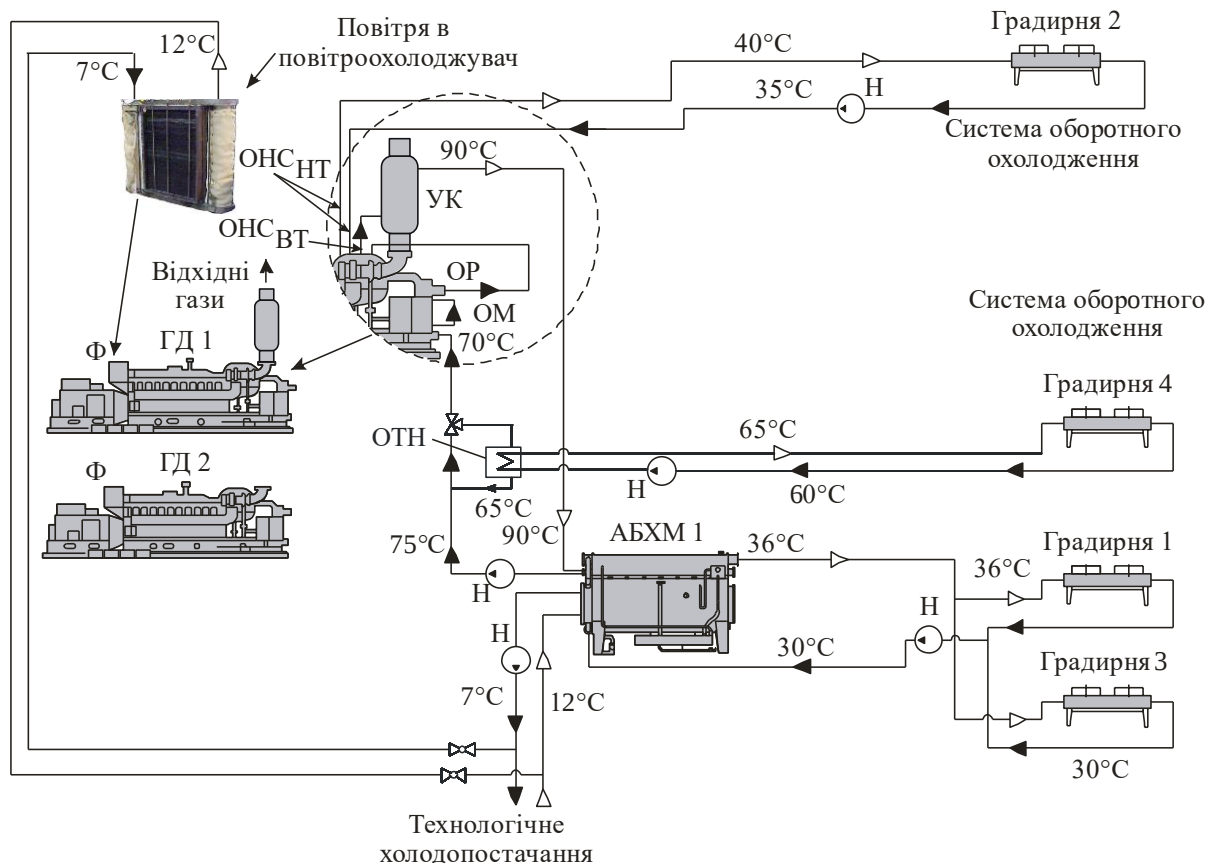


Рис. 2. Схема типової системи охолодження повітря машинного відділення, відповідно на вході ТК ГД, в АБХМ, та охолодження надувного повітря радіатором; Ф – фільтр; ОМ – охолоджувач мастила; ОР – охолоджувач рубашки двигуна; УК – утилізаційний котел; $\text{ОНС}_{\text{НТ}}$ і $\text{ОНС}_{\text{ВТ}}$ – низько- та високотемпературний охолоджувачі наддувної ГПС; ОН – охолоджувач теплоносія; Н – насос; градирня 4 – аварійного скидання тепла

Особливо гостро проблема трансформації теплоти стоїть у разі УАЕ технологічного призначення, як наприклад ТОВ "Сандора". Дефіцит холоду для технологічних споживачів холоду викликає необхідність його покривання електропривідними парокompресорними холодильними машинами (ПКХМ), що призводить до різкого зростання споживання електричної енергії, відповідно й паливно-енергетичних ресурсів в цілому. При цьому скорочується холодопостачання від АБХМ до центрального кондиціонера охолодження припливного повітря машинного відділення, відповідно, і на вході ГД, що призводить до зростання питомої витрати палива, тобто погіршення паливної ефективності ГД JMS 420 GS (рис. 3-5).

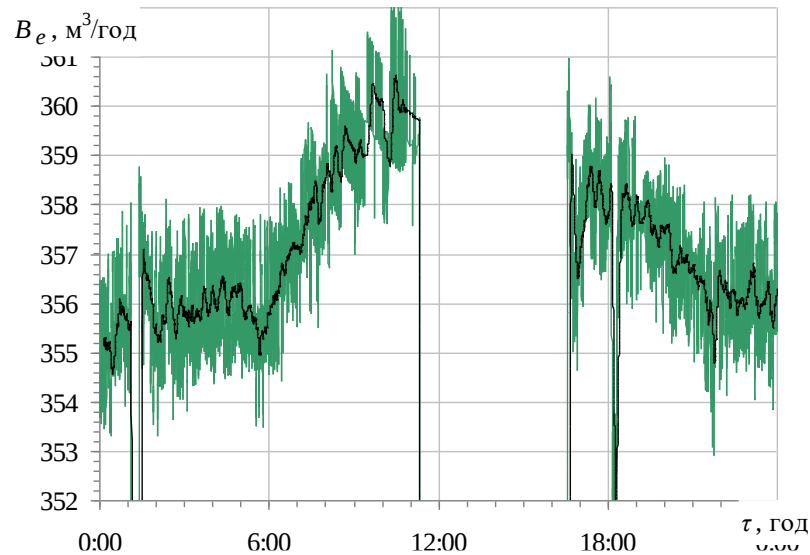


Рис. 3. Витрата паливного газу B_e при скороченні холодопостачання від АБХМ та без охолодження (12-17 год) повітря на вході ГД

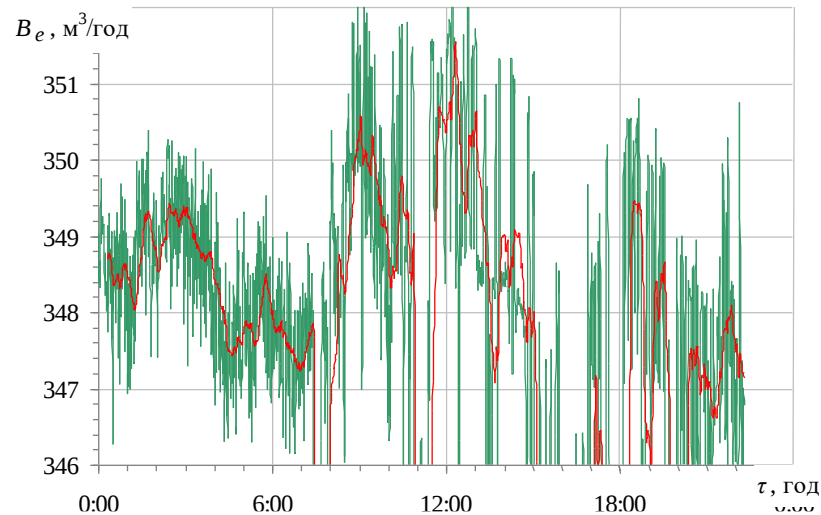


Рис. 4. Витрата паливного газу B_e при охолодженні повітря на вході ГД

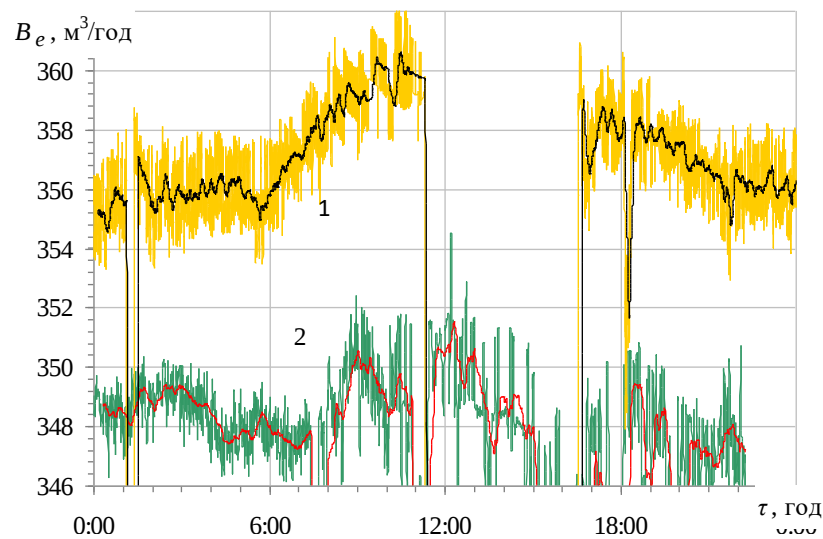


Рис. 5. Витрата паливного газу B_e : 1 – скорочення холодопостачання і без охолодження (12-17 год) повітря на вході ГД; 2 – з охолодженням повітря

Термічний стан ГД забезпечується підтриманням температури зворотного (охо-

лодженого) теплоносія на вході ГД не вище 70°C , оскільки він є водночас і охолоджувальним для відведення теплоти від вузлів охолодження (рубашки, головок циліндрів тощо) двигунів і мастила (рис.2). В той же час ефективність трансформації теплоти в холод в АБХМ висока за умови зниження температури гарячої води як теплоносія в АБХМ не більше ніж на 15°C , тобто до $75\dots 80^{\circ}\text{C}$ при її температурі на виході з ГД (на вході АБХМ) 90°C . Для підтримання температури зворотного теплоносія на вході ГД на безпечному рівні 70°C його додатково охолоджують в радіаторі "аварійного скидання" (рис. 2). При цьому втрати теплоти сягають 30 %.

Це свідчить про наявність додаткових резервів використання зворотної теплоти шляхом її більш глибокої утилізації для охолодження повітря за принципово нового підходу до охолодження повітря ГД й утилізації теплоти зворотного теплоносія після АБХМ в ЕХМ у єдиному ланцюгу теплових потоків, взаємно пов'язаних їх трансформацією.

Аналіз даних моніторингу параметрів систем охолодження та утилізації УАЕ дозволяє не тільки визначити теплові втрати зворотного теплоносія після АБХМ при трансформації скидної теплоти ГД, а й поєднати єдиним ланцюгом додаткові резерви, пов'язані з їх утилізацією в ЕХМ, з витратою холоду на охолодження повітря ГД з метою підвищення паливної економічності.

За результатами аналізу у другому розділі обґрунтовано напрям підвищення ефективності охолодження повітря ГД в АБХМ за принципово нового підходу з використанням теплоти, що лишається після її перетворення в холод в АБХМ і сягає 30...40 %, шляхом її глибокої утилізації в ЕХМ у єдиному ланцюгу "утилізація зворотної теплоти після АБХМ в ЕХМ – охолодження повітря ГД.

У **третьому розділі** наведено результати аналізу даних моніторингу паливної економічності ГД JMS 420 GS фірми "GE-Jenbacher" (специфікаційні електрична потужність 1400 кВт і тепла потужність 1500 кВт кожного) в залежності від охолодження повітря.

Ефект від охолодження повітря ГД оцінювали за зміною електричної потужності N_e і об'ємної витрати газу B_e як показників паливної економічності ГД. Фірми-виробники ГД, як правило, не дають в доступних інформаційних джерелах даних зі зміни N_e і B_e в залежності від кліматичних умов експлуатації. Обробка даних зі зміни N_e і B_e , отриманих у процесі моніторингу характеристик ГД, викликає значні труднощі через одночасний вплив на N_e і B_e температур зовнішнього повітря на вході радіатора $t_{p.bx}$ системи охолодження надувної ГПС і повітря на вході ГД $t_{ГД.bx}$. Тому дані моніторингу з N_e і B_e обчислювали з урахуванням впливу окремо температур зовнішнього повітря на вході радіатора $t_{p.bx}$ і повітря на вході ГД $t_{ГД.bx}$.

Метою обробки даних моніторингу з $N_e = f(t_{p.bx})$ і $B_e = f(t_{p.bx})$ є знаходження зміни потужності ГД JMS 420 GS ΔN_e і об'ємної витрати газу ΔB_e , що припадають на зміну температури $\Delta t_{п.р}$ повітря на вході радіатора на 1°C , тобто $\Delta N_e / \Delta t_{п.р}$ і $\Delta B_e / \Delta t_{п.р}$.

При цьому дані моніторингу $\Delta N_e / \Delta t_{п.р}$ і $\Delta B_e / \Delta t_{п.р}$ формувалися при різних, однак практично незмінних (в межах 1°C) температурах повітря на вході ГД $t_{ГД.bx}$. Це давало можливість досліджувати вплив температури повітря на вході радіатора $t_{p.bx}$ як залежності $\Delta b_e / \Delta t_{п.р} = f(t_{p.bx})$ при різних температурах повітря на вході ГД $t_{p.bx}$ (рис. 6).

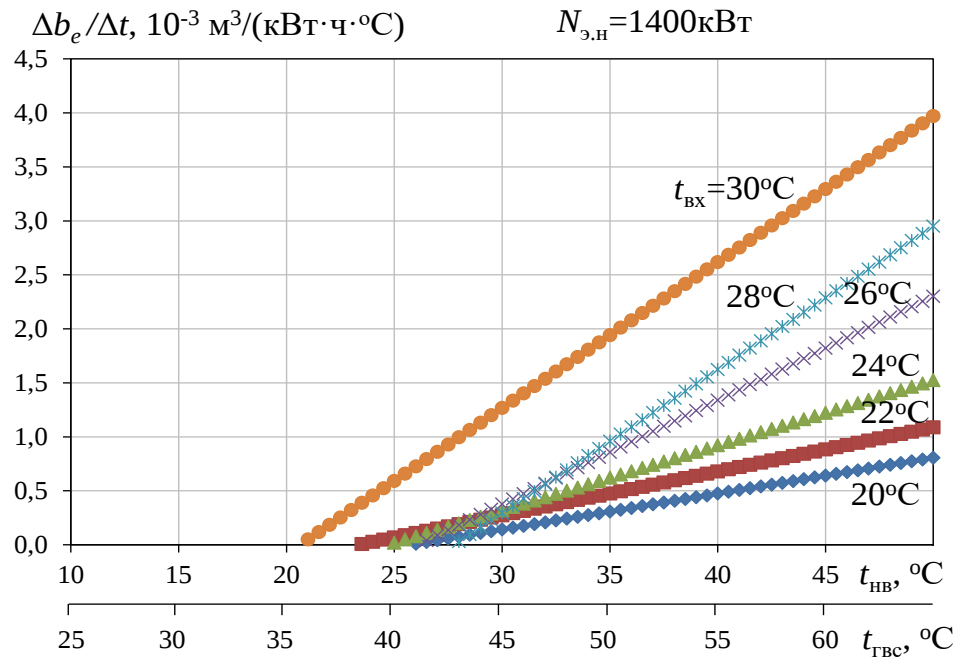


Рис. 6. Залежності зміни питомої об'ємної витрати палива ГД JMS 420 GS $\Delta b_e / \Delta t_{\text{HB}}$, що припадає на зміну температури зовнішнього повітря на вході в радіатор охолодження надувної ГПС $\Delta t_{\text{HB}} = 1^\circ\text{C}$, від температури зовнішнього повітря на вході радіатора t_{HB} при різних температурах повітря на вході ГД $t_{\text{BX}} = 20 \dots 30^\circ\text{C}$

Як показали розрахунки, для кожного інтервалу значень t_{HB} в 1°C при $t_{\text{P.BX}} = 35^\circ\text{C}$ відносна похибка не перевищує 5 %.

На рис. 7 і 8 наведено порівняння розрахункових даних з потужності та об'ємної витрати палива ГД JMS 420 GS у відносних величинах (віднесених до номінальних – специфікаційних показників $N_{\text{е.н}}$ і $B_{\text{е.н}}$) з даними моніторингу.

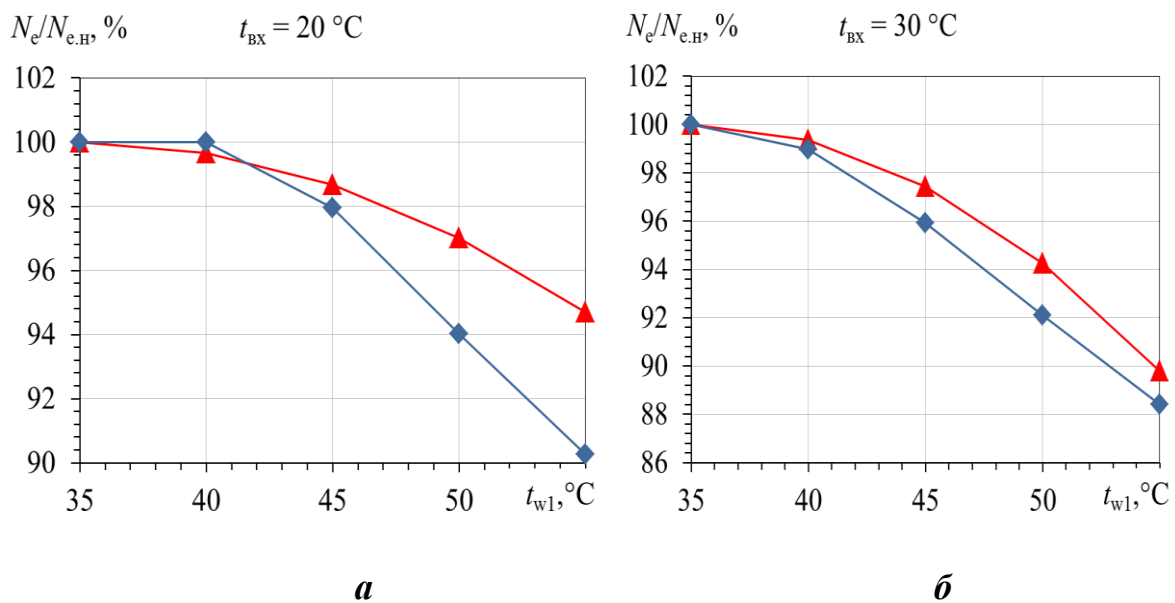


Рис. 7. Порівняння розрахункових і даних моніторингу $N_e / N_{\text{е.н}}$ від температури води системи охолодження надувного повітря t_{w1} при температурах повітря на вході ГД: **а** – $t_{\text{BX}} = 20^\circ\text{C}$; **б** – $t_{\text{BX}} = 30^\circ\text{C}$: $\blacktriangle$ - моніторинг; $\blacklozenge$ - розрахункові

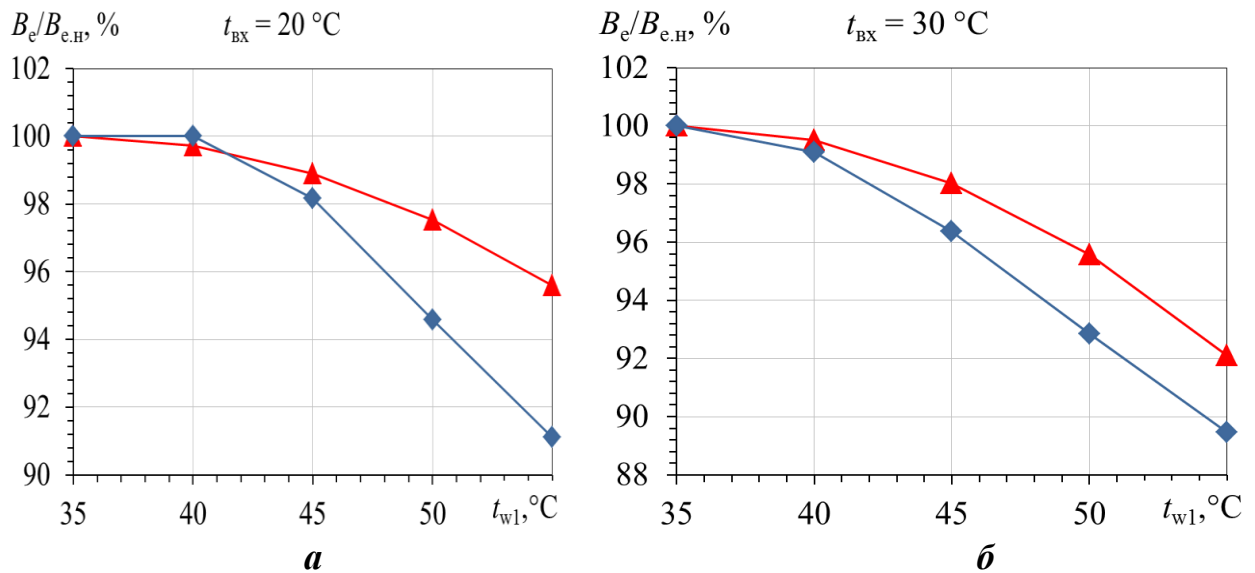


Рис. 8. Порівняння розрахункових і експериментальних даних $B_e/B_{e,n}$ від температури води системи охолодження наддувного повітря t_{w1} при температурах на вході ГД: **a** – $t_{BX} = 20$ °C; **б** – $t_{BX} = 30$ °C: ▲ - моніторинг; ◆ - розрахункові

За результатами досліджень у розділі 3 отримані дані щодо зміни питомої об'ємної витрати палива db_{ev} , що припадає на зміну температури зовнішнього повітря $t_{нв}$ на вході градирні на 1 °C, $db_{ev}/dt_{нв}$, при різних температурах повітря t_{BX} на вході ГД, виходячи з яких можна оцінювати ефект від реалізації розроблених технічних рішень.

Показано, що при роботі ГД J 420 GS-AO5) при температурі повітря на вході турбокомпресора $t_{BX} = 26...30$ °C більш глибоке охолодження наддувного повітря при температурі зовнішнього повітря на вході градирні, наприклад $t_{нв} = 30...35$ °C, дозволяє скоротити споживання палива на 2...3 % (від 102...105 % до 100 %) у порівнянні з його традиційним охолодженням в системі оборотного радіатором охолодження.

Відхилення експериментальних даних від розрахункових значень становить: $\delta(N_e/N_{e,n}) = 0,2...4,9\%$, $\delta(B_e/B_{e,n}) = 0,11...4,8\%$.

Таким чином, отримані за результатами моніторингу дані зі зменшення питомої витрати палива при зниженні температури зовнішнього повітря на вході радіатора системи оборотного охолодження повітря, дають можливість оцінювати ефект від охолодження наддувного повітря ГД залежно від глибини охолодження повітря, а відтак і необхідних витрат холодопродуктивності ЕХМ.

У четвертому розділі наведено основні положення математичної моделі та результати порівняння розрахованих за моделлю показників ефективності трансформації теплоти в холод з тепловими характеристиками АБХМ, наведеними фірмами-розробниками, а також з даними моніторингу параметрів роботи АБХМ діючої УАЕ, що підтверджують її адекватність.

Аналіз даних моніторингу параметрів систем охолодження та утилізації УАЕ дозволяє не тільки визначити теплові втрати зворотного теплоносія після АБХМ при трансформації скидної теплоти ГД, а й поєднати єдиним ланцюгом додаткові резерви, пов'язані з їх утилізацією, з витратою холоду на охолодження повітря ГД з метою підвищення паливної економічності.

Для того, щоб оцінити втрати теплоти $Q_{г.втр}$, що скидається в атмосферу, і ефект від її повернення в цикл трансформації тепла в холод, проаналізовано дані моніторингу параметрів УАЕ: температури гарячої води $t_{гв1}$ з ГД JMS 420 GS в АБХМ, зворотної води після АБХМ $t_{гв4}$ – перед охолоджувачем теплоносія ОТН контуру скидання тепла в атмосферу (рис. 2) та охолодженої зворотної води після ОТН на вході в ГД $t_{гв5}$.

Блок-схему розрахунку характеристик системи трансформації відведеної від ГД теплоти за розробленою математичною моделлю розрахунку додаткової холодопродуктивності $Q_{0.ЕХМ}$, отриманої шляхом утилізації теплоти зворотного теплоносія після АБХМ в ЕХМ (теплових коефіцієнтів ЕХМ ζ_E і системи трансформації теплоти ГД в холод $\zeta_{СТ}$, холодопродуктивності $Q_{0.ЕХМ}$), наведено на рис. 9.

Позначення і основні співвідношення (до блок-схеми на рис. 9).

Теплове навантаження на АБХМ:

$$Q_{гАБХМ} = G_{г} c_{г} (t_{гв1} - t_{гв2}),$$

де $G_{г}$ – витрата гарячої води;

$c_{г}$ – теплоємність води;

$t_{гв1}$ і $t_{гв2}$ – температури гарячої води на вході та виході АБХМ.

Тепловий коефіцієнт АБХМ $\zeta_{АБХМ} = f(t_{гв1}, t_{ов}, t_x)$ – за характеристикою фірми-розробника "AR-D500L2 Century".

Холодопродуктивність АБХМ: $Q_{0.АБХМ} = Q_{гАБХМ} \zeta_{АБХМ}$.

Теплове навантаження на ЕХМ: $Q_{гЕХМ} = G_{г} c_{г} (t_{гв2} - t_{гв3})$, де $t_{гв3}$ – температура гарячої води на виході ЕХМ.

Тепловий коефіцієнт ЕХМ $\zeta_{ЕХМ} = f(t_{ге}, t_k, t_0)$ – за методикою Соколова-Зінгера в залежності від температур

кипіння хладону в генераторі ЕХМ $t_{ге} = t_{гв2} + 5 \text{ } ^\circ\text{C}$;

кипіння хладону у випарнику ЕХМ $t_0 = 7 \text{ } ^\circ\text{C}$;

конденсації $t_k = t_{ов} + 5 \text{ } ^\circ\text{C}$; де температура охолоджувальної води з градирні відкритого типу $t_{ов} = t_m + 3 \text{ } ^\circ\text{C}$; t_m – температура повітря за мокрим термометром.

Холодопродуктивність ЕХМ: $Q_{0.ЕХМ} = Q_{гЕХМ} \zeta_{ЕХМ}$.

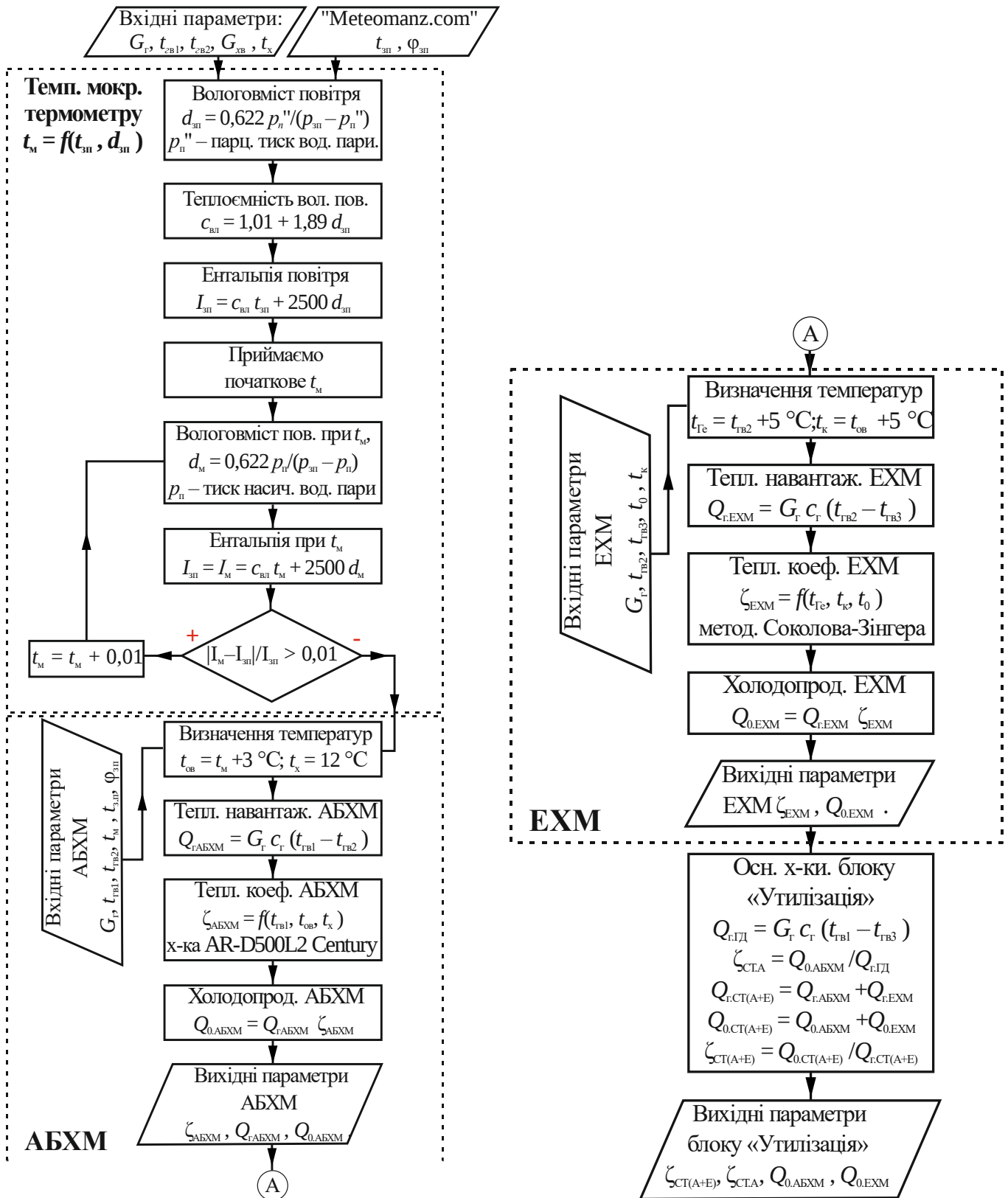


Рис. 9. Блок-схема розрахунку характеристик системи трансформації відведеної від ГД: холодопродуктивностей ЕХМ Q_{0EXM} (додаткової) та АБХМ Q_{0ABXM} (за традиційної системи з АБХМ)

Результати обчислення даних моніторингу з температур гарячої води (теплоносія) упродовж $\tau = 12^{00} - 24^{00}$ (28.07.2019) для базового варіанта за даними моніторингу наведені на рис. 10.

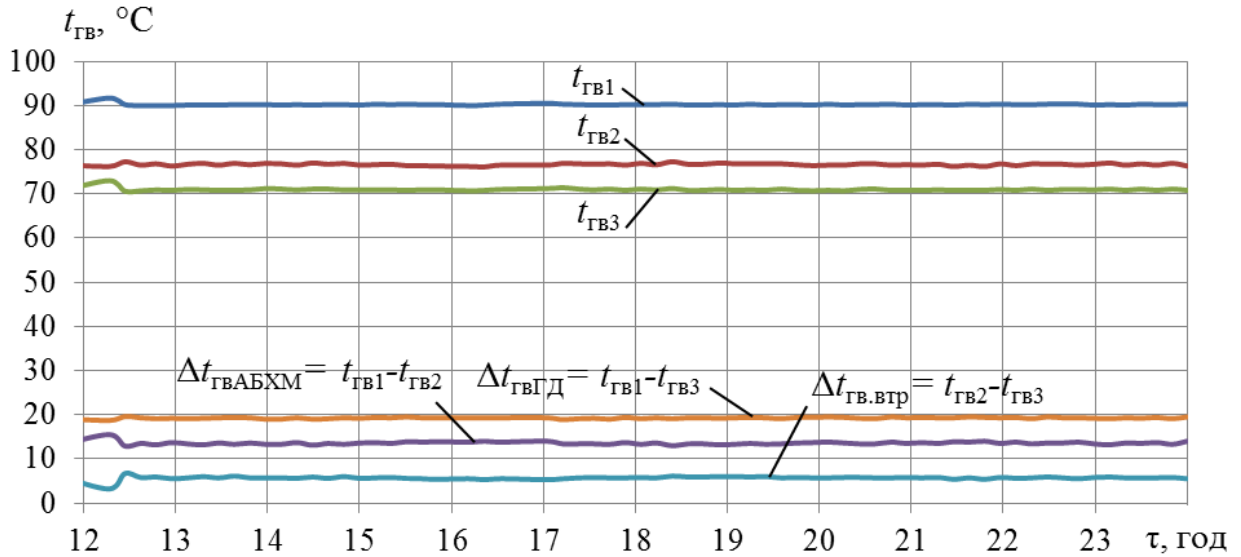


Рис. 10. Температури гарячої води $t_{ГВ1}$ на вході АБХМ, зворотної води після АБХМ $t_{ГВ2}$ та охолодженої зворотної води після ТОЗТ на вході в ГД $t_{ГВ3}$, різниці температур гарячої та охолодженої в АБХМ води $\Delta t_{ГВАБХМ} = t_{ГВ1} - t_{ГВ2}$ та зворотної води в охолоджувачі ТОЗТ через втрати теплоти $\Delta t_{ГВ.ВТР} = t_{ГВ2} - t_{ГВ3}$ для базового варіанта за даними моніторингу

З графіків на рис. 10 видно, що тільки частина теплоти, що відводиться від двигуна і визначається різницею температур $\Delta t_{ГВАБХМ} = t_{ГВ1} - t_{ГВ2} = 14...15\text{ }^{\circ}\text{C}$, трансформується в АБХМ в холод, тоді як вся наявна теплота визначається різницею температур $t_{ГВ1} - t_{ГВ3} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

За результатами моніторингу системи трансформації теплоти газового двигуна JMS 420 GS-N.LC GE фірми Jenbacher в АБХМ AR-D500L2 фірми Century, наведеними на рис. 10, були розраховані теплові потоки в системі трансформації теплоти в холод (рис. 11).

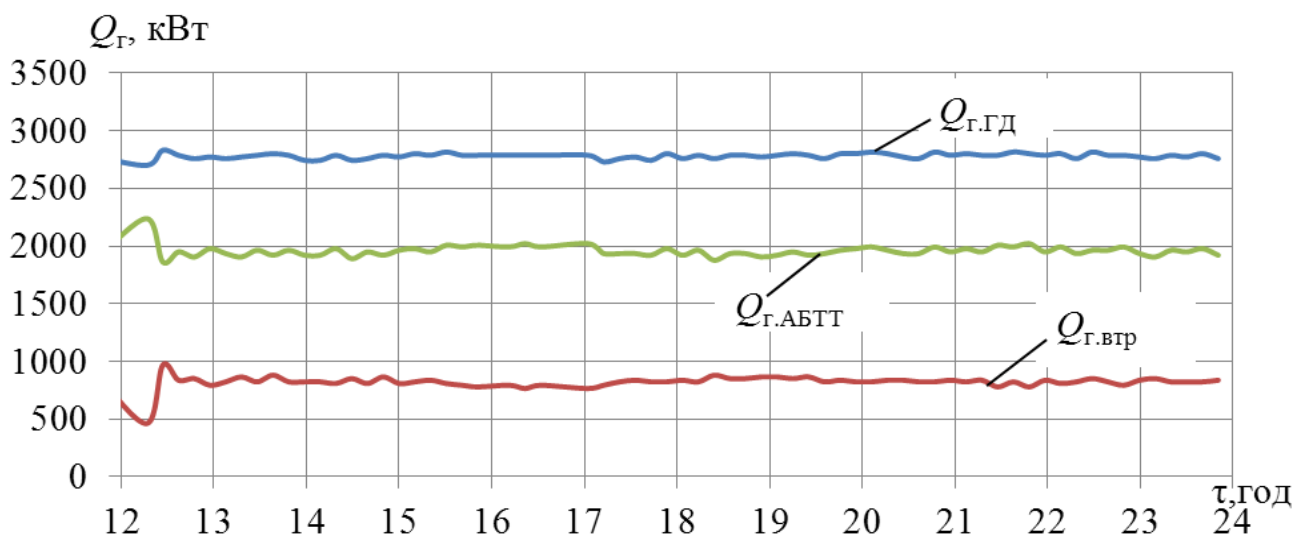


Рис. 11. Значення загальної кількості теплоти $Q_{ГД}$ гарячого теплоносія, відведеної від двох ГД, теплоти, трансформованої в АБХМ в холод, $Q_{Г.АБТТ}$, та втрат теплоти $Q_{Г.ВТР}$ для базового варіанта за даними моніторингу

Як видно з рис. 11, загальна кількість теплоти, відведеної від ГД у вигляді гарячої води з температурою $t_r = 90^\circ\text{C}$ становить $Q_{г.ГД} \approx 2800$ кВт, з якої в АБХМ використовується тільки частина, $Q_{г.АБТТ} \approx 2000$ кВт. У той же час через обмеження по температурі зворотного теплоносія на вході в ГД $t_{гвз} = 70^\circ\text{C}$ в теплообміннику ТОЗТ та радіаторі аварійного скидання від нього відводиться надлишок (втрати) теплоти $Q_{г.втр} \approx 800$ кВт, які складають $Q_{г.втр}/Q_{г.ГД}$ майже 30 % загальної її кількості $Q_{г.ГД}$, відведеної від ГД.

Розроблене схемне рішення утилізації теплоти зворотного теплоносія контуру аварійного скидання хладоною ЕХМ, як наприклад на R142В, наведене на рис. 12.

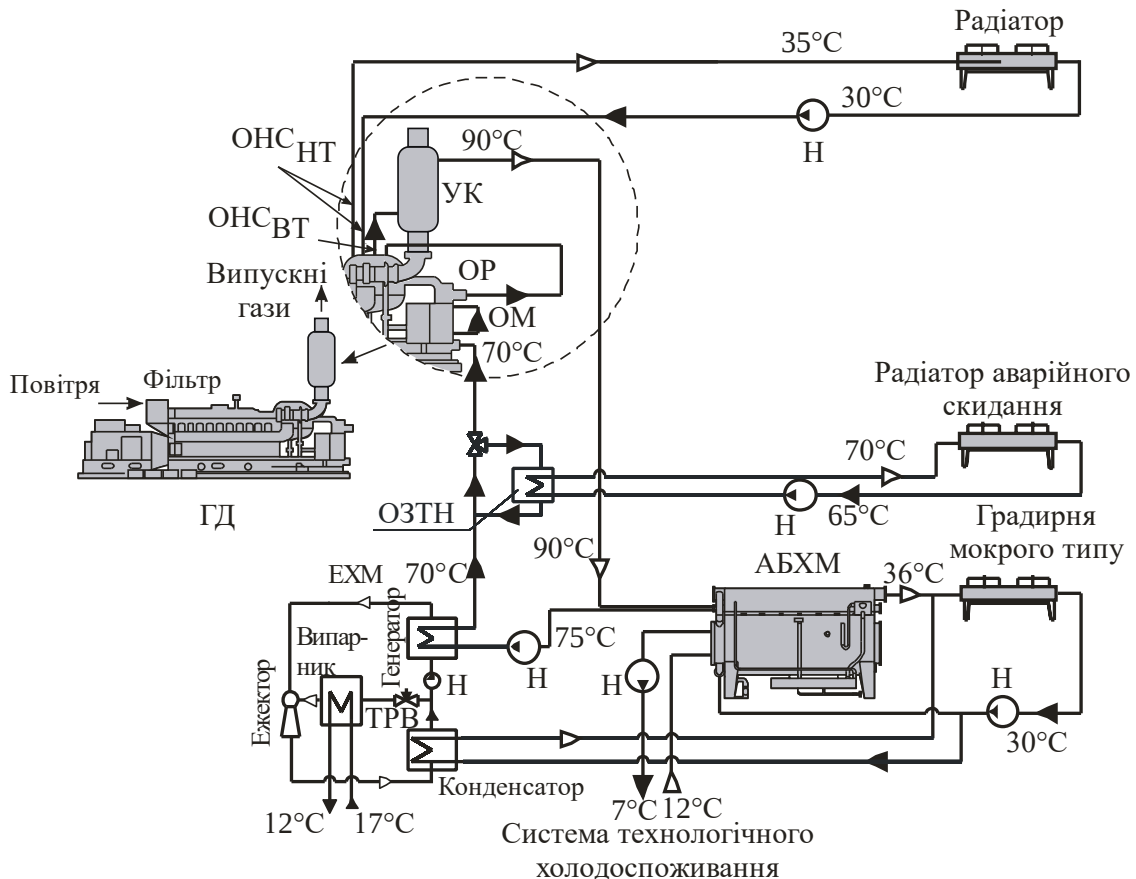


Рис. 12. Схема розробленої системи утилізації теплоти контуру аварійного скидання в ЕХМ у складі існуючої системи тепловідведення ГД JMS 420 GS з АБХМ: ОМ – охолоджувач мастила; ОР – охолоджувач рубашки двигуна; УК – утилізаційний котел; ОНС_{НТ} і ОНС_{ВТ} – низько- і висококатемпературний ступені охолоджувача наддувної ГПС; ОЗТН – охолоджувач зворотного теплоносія; Н – насос; ТРВ – терморегулюючий вентиль

Ежекторна ЕХМ використовує теплоту теплоносія після АБХМ з температурою $t_r = 75 \dots 80^\circ\text{C}$ і не впливає на характеристики АБХМ (рис. 12).

При охолодженні конденсатора ЕХМ охолоджувальною водою з температурою $t_{ов} = 20 \dots 25^\circ\text{C}$ системи оборотного охолодження з градирнею мокрого типу мають місце наступні параметри ЕХМ. При температурі кипіння R142b в генераторі ЕХМ $t_r = 70^\circ\text{C}$, конденсації R142b $t_{кЕ} = 30^\circ\text{C}$, кипіння у випарнику $t_0 = 7^\circ\text{C}$ тепловий коефіцієнт ЕХМ $\zeta_E = 0,25$, а при температурі конденсації R142b в ЕХМ $t_{кЕ} = 25^\circ\text{C}$ значно вищі теплові коефіцієнти: $\zeta_E = 0,35$ (проти $\zeta_E = 0,25$ при $t_{кЕ} = 30^\circ\text{C}$).

Значення теплових коефіцієнтів АБХМ $\zeta_{\text{АБТТ}}$, ЕХМ $\zeta_{\text{ЕТТ}}$, базової системи трансформації тепла тільки в АБХМ $\zeta_{\text{СТА6}}$ та розробленої системи трансформації з АБХМ і ЕХМ $\zeta_{\text{СТ(А6+ЕТТ)}}$ дано на рис. 13.

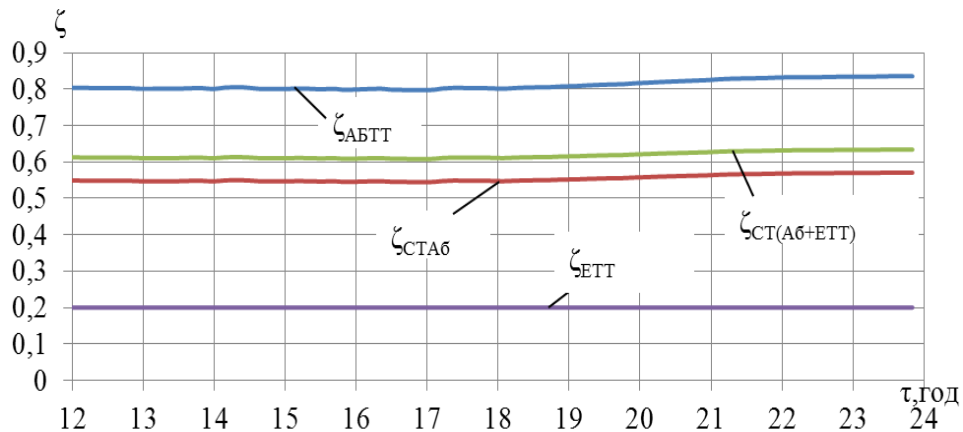


Рис. 13. Значення теплових коефіцієнтів АБХМ $\zeta_{\text{АБТТ}}$, ЕХМ $\zeta_{\text{ЕТТ}}$, базової системи трансформації скидного тепла тільки в АБХМ $\zeta_{\text{СТА6}}$ та розробленої системи трансформації з АБХМ і ЕХМ $\zeta_{\text{СТ(А6+ЕТТ)}}$

Значення холодопродуктивності ЕХМ $Q_{0,\text{ЕТТ}}$, базової системи трансформації скидного тепла тільки в АБХМ $Q_{0,\text{А6}}$ та розробленої системи трансформації з АБХМ і ЕХМ $Q_{0,\text{А6+ЕТТ}}$ наведено на рис. 14.

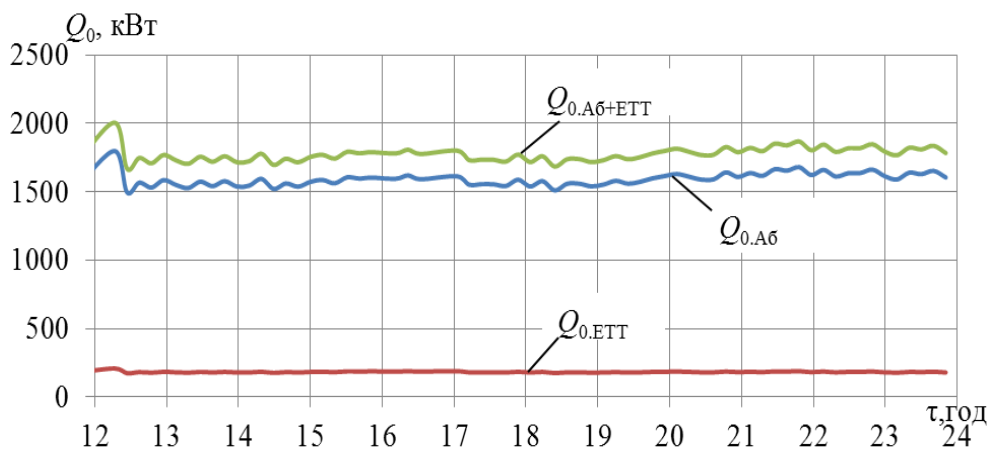
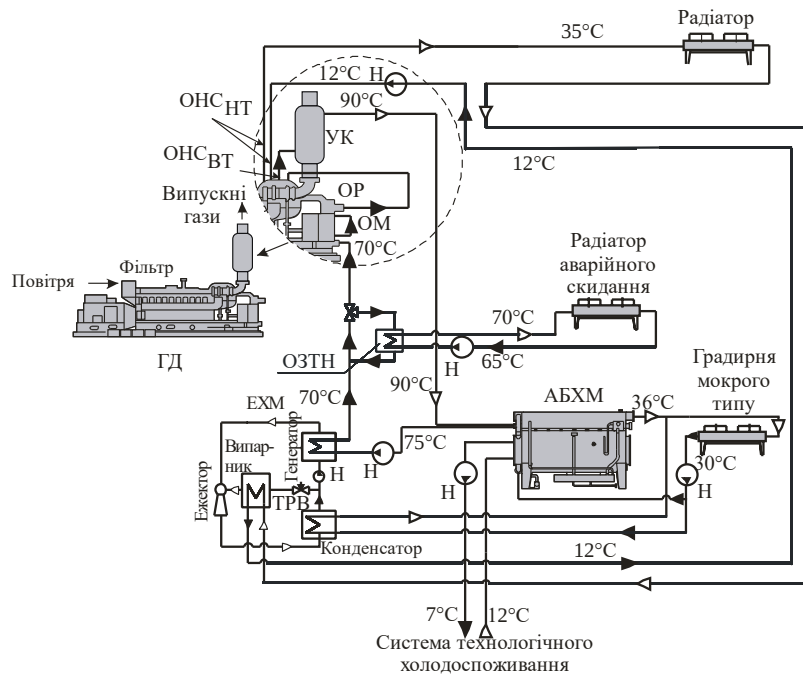
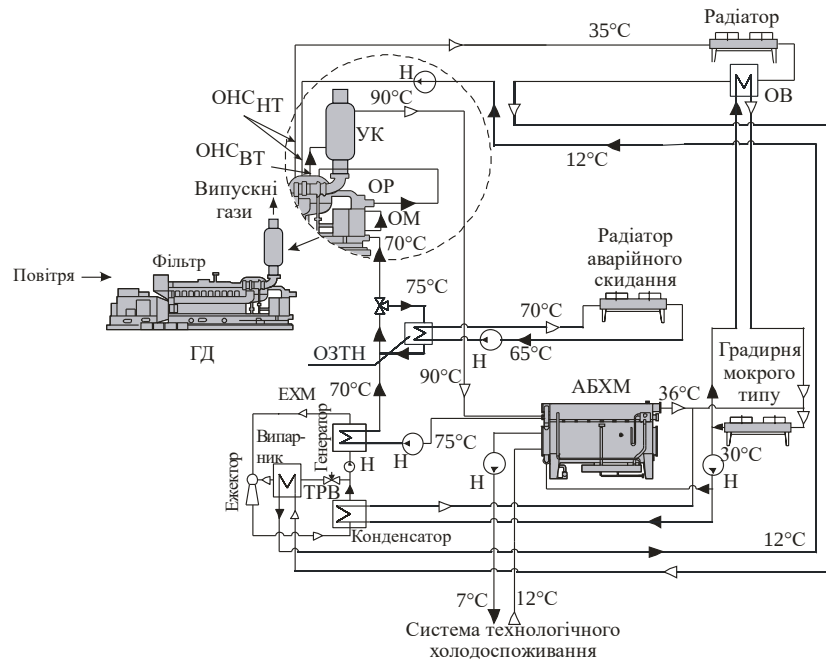


Рис. 14. Значення холодопродуктивності ЕХМ $Q_{0,\text{ЕТТ}}$, базової системи трансформації скидного тепла тільки в АБХМ $Q_{0,\text{А6}}$ та розробленої системи трансформації з АБХМ і ЕХМ $Q_{0,\text{А6+ЕТТ}}$

Як видно, додатково отримана в ЕХМ холодопродуктивність завдяки утилізації втрат теплоти зворотного теплоносія від двох ГД становить $Q_{0,\text{ЕТТ}} = 200$ кВт, а від одного ГД відповідно $Q_{0,\text{Е}} = 100$ кВт. Вона може бути використана для охолодження надувного повітря (газоповітряної суміші) в ОНС_{НТ}, тобто в єдиному ланцюгу "утилізація зворотної теплоти після АБХМ в ЕХМ– охолодження повітря ГД" (розділ 5), додатково до охолодження радіатором або градирнею мокрого типу відповідно до розроблених систем охолодження на рис. 15.



а



б

Рис. 15. Схема розробленої системи утилізації теплоти контуру аварійного скидання в ЕХМ у складі існуючої системи тепловідведення ГД JMS 420 GS з АБХМ: ОМ – охолоджувач мастила; ОР – охолоджувач рубашки двигуна; УК – утилізаційний котел; ОНСнт і ОНСвт – низько- і високотемпературний ступені охолоджувача надувної ГПС; ОЗТН – охолоджувач зворотного теплоносія; Н – насос; ТРВ – терморегулюючий вентиль

Зниження температури надувного повітря в ОНП_{НТ} системи охолодження з градирнею мокрого типу розраховували як $\Delta t_{\text{нп.мг}} = t_{\text{нп.р}} - t_{\text{нп.мг}}$ порівняно з його традиційним охолодженням радіатором до температури $t_{\text{нп.р}}$ (рис 16). Температуру надувного повітря, охолодженого в ОНП_{НТ} типової системи охолодження з радіатором $t_{\text{нп.р}}$ розраховували за алгоритмом: для поточних температур зовнішнього повітря за програмою фірми "Guntner" визначали температуру охолодженої води на виході з радіатора t_{wp2} , а з урахуванням різниці температур у проміжному теплообміннику

(ПТО) $\Delta t_{\text{ПТО}} = 5^\circ\text{C}$ та різниці температур $\Delta t_{\text{ОНП}_{\text{НТ}}} \approx 10^\circ\text{C}$ в ОНП_{НТ} (між надувним повітрям $t_{\text{нп.Р}}$ і водою після ПТО на вході ОНП_{НТ} t_{w1} як $\Delta t_{\text{ОНП}_{\text{НТ}}} = t_{\text{нп.Р}} - t_{\text{w1}} \approx 10^\circ\text{C}$) визначали температуру охолодженого в ОНП_{НТ} наддувного повітря $t_{\text{нп.Р}} = t_{\text{wP2}} + \Delta t_{\text{ПТО}} + \Delta t_{\text{ОНП}_{\text{НТ}}}$.

Як показали розрахунки градірні мокрого типу, температура охолодженої води в ній на 3°C вище ніж за мокрим термометром $t_{\text{м}}$. Згідно з розрахунками пластинчастих теплообмінників за програмою фірми-розробника "Guntner" різниця температур в них між тепло- і холодоносіями становить $3...5^\circ\text{C}$. Температуру надувного повітря, охолодженого в ОНП_{НТ} системи охолодження з градірнею мокрого типу розраховували як $t_{\text{нп.МГ}} = t_{\text{м}} + 3 + \Delta t_{\text{ПТО}} + \Delta t_{\text{ОНП}_{\text{НТ}}}$, де $\Delta t_{\text{ПТО}} = 5^\circ\text{C}$, $\Delta t_{\text{ОНП}_{\text{НТ}}} = 10^\circ\text{C}$, температура охолодженої води на виході з градірні мокрого типу $t_{\text{wМГ2}} = t_{\text{м}} + 3^\circ\text{C}$ згідно з рекомендаціями розробників градірень та практики їх експлуатації.

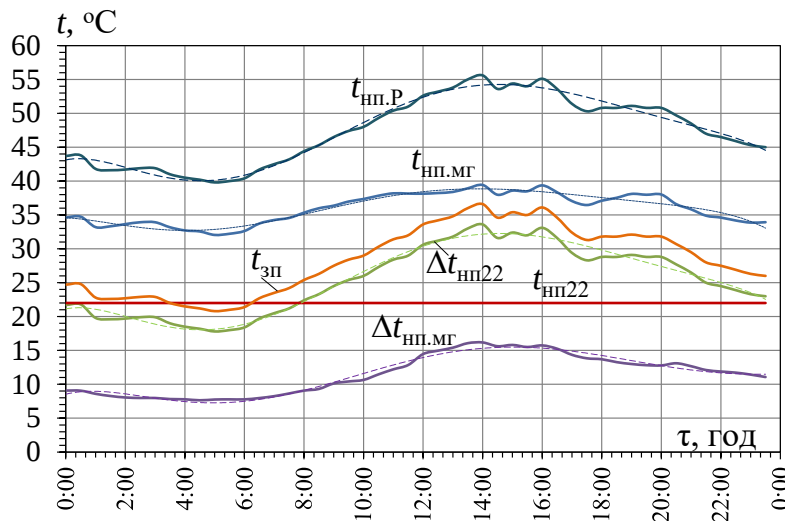


Рис. 16. Поточні температури охолодженого в ОНП_{НТ} наддувного повітря систем охолодження з радіатором $t_{\text{нп.Р}}$ та градірнею мокрого типу $t_{\text{нп.МГ}}$, зниження температури надувного повітря в ОНП_{НТ} системи охолодження з градірнею мокрого типу: $\Delta t_{\text{нп.МГ}}$, зниження температури надувного повітря в ОНП_{НТ} з градірнею мокрого типу і ЕХМ $\Delta t_{\text{нп.22}}$ порівняно з температурою наддувного повітря, охолодженого в ОНП_{НТ} з радіатором $t_{\text{нп.Р}}$: $\Delta t_{\text{нп.МГ}} = t_{\text{нп.Р}} - t_{\text{нп.МГ}}$, $\Delta t_{\text{нп.22}} = t_{\text{нп.Р}} - t_{\text{нп.22}}$ (при $t_{\text{нп.22}} = 22^\circ\text{C}$); $t_{\text{нп.МГ}} = t_{\text{м}} + 3 + \Delta t_{\text{ПТО}} + \Delta t_{\text{ОНП}_{\text{НТ}}}$, де $\Delta t_{\text{ПТО}} = 5^\circ\text{C}$, $\Delta t_{\text{ОНП}_{\text{НТ}}} = 10^\circ\text{C}$

Про ефект від охолодження надувного повітря градірнею мокрого типу порівняно з типовим охолодженням у вигляді зменшення питомої витрати палива $\Delta b_{\text{е.нп.МГ}}$, збільшення електричної потужності в абсолютних $\Delta N_{\text{нп.МГ}}$ й у відносних величинах $\Delta N_{\text{нп.МГ}}, \%$, можна судити за рис. 17.

Завдяки малим термічним опорам в ПТО і контактному охолодженню води в градірні мокрого типу витрати холоду на охолодження надувного повітря зведені до мінімуму.

Як видно, система охолодження з градірнею мокрого типу забезпечує зниження температури надувного повітря на величину $\Delta t_{\text{нс.МГ}} = t_{\text{нс.с}} - t_{\text{нс.МГ}} = 10...15^\circ\text{C}$ порівняно з традиційним радіаторним охолодженням.

Для того, щоб забезпечити більш глибоке охолодження надувного повітря необхідне додаткове (до охолодження в градірні) зниження температури охолоджуючої води перед її подачею у ОНП_{НТ}. Для цього доцільно задіяти холод, який одержують в ЕХМ шляхом утилізації втрат теплоти через відведення її надлишку в атмосферу

радіатором аварійного скидання за традиційної системи утилізації теплоти ГД в АБХМ (рис. 2).

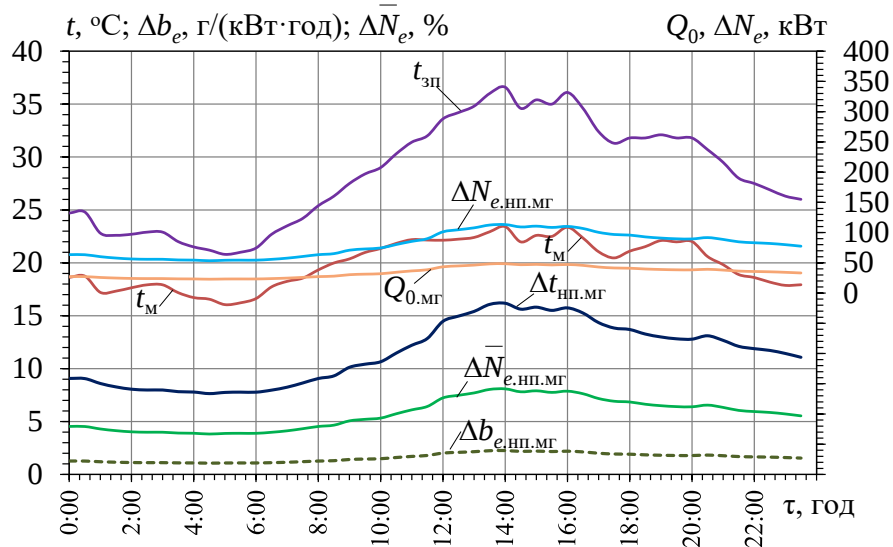


Рис. 17. Поточні температури зовнішнього повітря за сухим $t_{зп}$ і за мокрим термометрами t_m , охолодженого надувного повітря радіатором $t_{нп.р}$ та градирнею мокрого типу $t_{нп.мг}$, зниження температури надувного повітря в ОНП_{НТ} системи охолодження з градирнею мокрого типу $\Delta t_{нп.мг}$, холодопродуктивності градирні мокрого типу $Q_{0.мг}$, зменшення питомої витрати палива за рахунок охолодження надувного повітря градирнею мокрого типу $\Delta b_{e.нп.мг}$, збільшення електричної потужності $\Delta N_{нп.мг}$ й у відносних величинах $\Delta N_{нп.мг}$, %, порівняно з охолодженням надувного повітря радіатором

При охолодженні конденсатора ЕХМ охолоджувальною водою з температурою $t_{ов} = 20 \dots 25$ °С системи охолодження з градирнею мокрого типу мають місце наступні параметри ЕХМ. При температурі кипіння R142b в генераторі ЕХМ $t_r = 70$ °С, конденсації R142b $t_{ке} = 30$ °С, кипіння у випарнику $t_0 = 7$ °С тепловий коефіцієнт ЕХМ $\zeta_E = 0,25$, а при температурі конденсації R142b в ЕХМ $t_{ке} = 25$ °С теплові коефіцієнти значно вищі: $\zeta_E = 0,35$ (проти $\zeta_E = 0,25$ при $t_{ке} = 30$ °С).

В системах утилізації АБХМ використовує теплоту, відведену від двох ГД, відповідно в розроблених системах охолодження надувного повітря кожного ГД в ЕХМ при розрахунках враховують тільки половину холодопродуктивності ЕХМ, отриманої трансформацією теплових втрат (зворотної теплоти) після АБХМ з температурою $t_r = 75 \dots 80$ °С.

Холодну воду з температурою $t_x = 12$ °С з випарника-охолоджувача води (ВОВ) ЕХМ подають безпосередньо в систему охолодження наддувної ГПС на вхід ОНП_{НТ} для охолодження ГПС. Відведену від ОНП_{НТ} воду спочатку охолоджують у проміжному ПТО водою з градирні мокрого типу, а потім у випарнику ЕХМ хладоном, киплячим при температурі близько $t_0 = 7$ °С, до температури $t_x = 12$ °С (рис.15, б).

Про витрати холодопродуктивності $Q_{0.22}$ на додаткове охолодження наддувного повітря в ЕХМ до 22 °С, наявну холодопродуктивність ЕХМ $Q_{0.Е}$ за рахунок використання теплових втрат та її надлишок $\Delta Q_{0.Е}$ понад її витрати $Q_{0.22}$, а також надлишок $\Delta Q_{0.Е+мг}$ сумарної холодопродуктивності ЕХМ $Q_{0.Е}$ і градирні $Q_{0.мг}$ понад її витрати $Q_{0.22}$ можна судити по рис. 18.

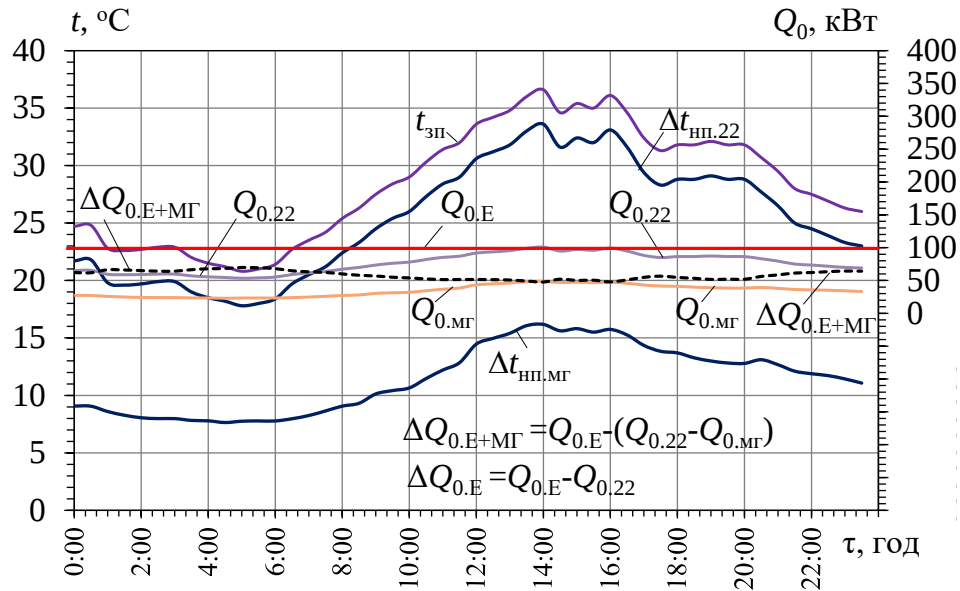


Рис. 18. Поточні значення додаткового (до охолодження радіатором) зниження температури надувного повітря $\Delta t_{\text{нп.22}}$ від $t_{\text{нп.р}}$ (радіатором) до 22 °С, відповідних витрат холодопродуктивності $Q_{0.22}$ на додаткове охолодження наддувного повітря в ЕХМ до 22 °С, витрат холодопродуктивності $Q_{0.МГ}$ градирні на попереднє охолодження надувного повітря на величину $\Delta t_{\text{нп.МГ}}$, наявної холодопродуктивності ЕХМ $Q_{0.Е}$ за рахунок використання теплових втрат та її надлишку $\Delta Q_{0.Е}$ понад її витрати $Q_{0.22}$, надлишку $\Delta Q_{0.Е+МГ}$ сумарної холодопродуктивності ЕХМ $Q_{0.Е}$ і градирні $Q_{0.МГ}$ понад її витрати $Q_{0.22}$: $\Delta t_{\text{нп.22}} = t_{\text{нп.р}} - 22$ °С; $\Delta Q_{0.Е} = Q_{0.Е} - Q_{0.22}$, $\Delta Q_{0.Е+МГ} = Q_{0.Е} + Q_{0.МГ} - Q_{0.22}$

Як видно, надлишок $\Delta Q_{0.Е+МГ}$ сумарної холодопродуктивності ЕХМ $Q_{0.Е}$ і градирні мокрого типу $Q_{0.МГ}$ понад її витрати $Q_{0.22}$ на додаткове (понад радіаторне) охолодження надувного повітря до 22 °С доволі значний і становить понад $\Delta Q_{0.Е+МГ} = 50$ кВт порівняно з його величиною $\Delta Q_{0.Е} = Q_{0.Е} - Q_{0.22}$ без використання холодопродуктивності $Q_{0.МГ}$ градирні мокрого типу на попереднє охолодження надувного повітря на величину $\Delta t_{\text{нп.МГ}}$.

Цей надлишок $\Delta Q_{0.Е+МГ} \approx 50$ кВт доцільно використовувати для охолодження повітря на вході ГД.

Про поліпшення паливної економічності та збільшення виробництва електричної потужності ГД завдяки додаткового охолодження надувного повітря в ЕХМ, що утилізує втрати теплоти зворотного теплоносія, та градирні мокрого типу порівняно з традиційним його охолодженням радіатором можна судити за результатами розрахунків на рис. 19.

Як видно, система охолодження надувного повітря з ЕХМ і градирнею мокрого типу забезпечує глибоке його охолодження – на 20...30 °С більше порівняно з традиційним радіатором: $\Delta t_{\text{нп.22}} = t_{\text{нп.р}} - t_{\text{нп.22}} = 25...30$ °С.

Система охолодження з градирнею мокрого типу забезпечує зниження температури надувного повітря на величину $\Delta t_{\text{нс.МГ}} = 10...15$ °С.

Про річну економію палива та помісячну завдяки охолодженню повітря для ГД JMS 420 GS Jenbacher можна судити за рис. 20.

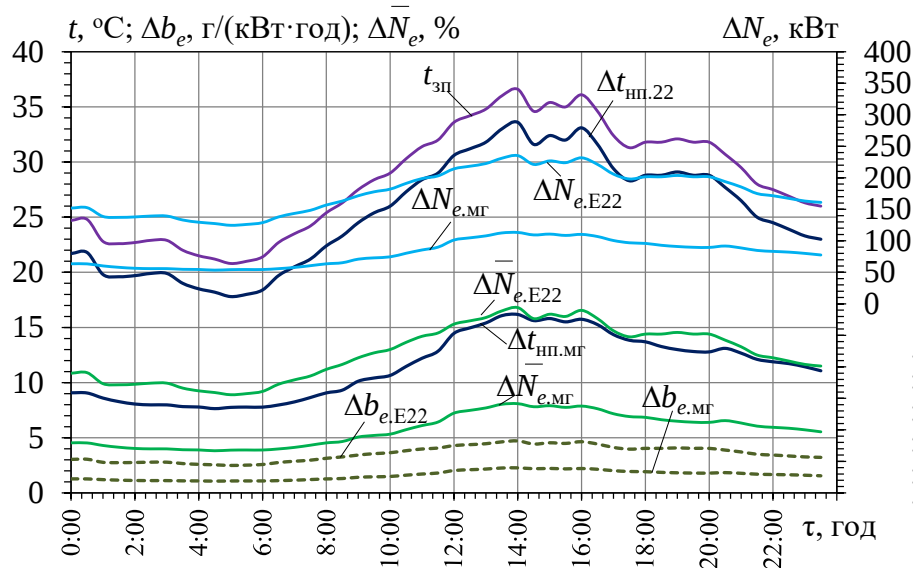


Рис. 19. Поточні значення зменшення питомої витрати палива $\Delta b_{e.22}$ за рахунок додаткового охолодження надувного повітря в ЕХМ і градирні до 22°C на величину $\Delta t_{\text{нп.22}}$, її величини $\Delta b_{e.МГ}$ – за рахунок охолодження надувного повітря в градирні на величину $\Delta t_{\text{нп.МГ}}$, а також відповідного збільшення електричної потужності $\Delta N_{e.E22}$ і $\Delta N_{e.МГ}$ та у відносних величинах $\Delta N_{e.E22}$ і $\Delta N_{e.МГ}$ %, протягом доби: $\Delta t_{\text{нп.22}} = t_{\text{нп.Р}} - 22^\circ\text{C}$

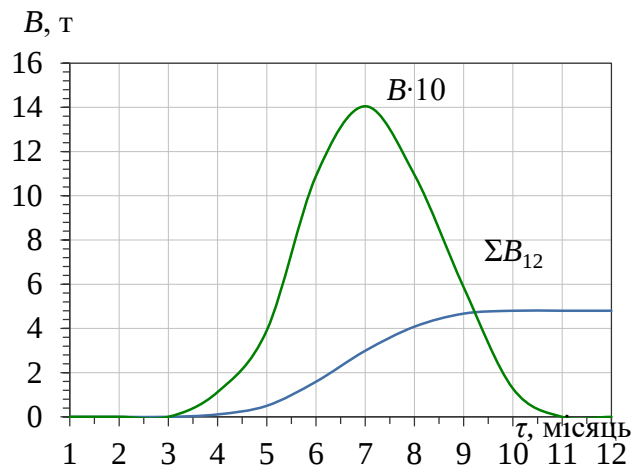


Рис. 20. Економія палива завдяки охолодженню повітря помісячно B і за рік B для ГД JMS 420 GS Jenbacher

Отже, застосування градирні мокрого типу як бустерного ступеня попереднього охолодження надувного повітря ГД забезпечує зменшення витрат холодопродуктивності ЕХМ у 1,5-2 рази, що дає можливість використовувати надлишок холодопродуктивності ЕХМ для охолодження повітря на вході ГД і для технологічних потреб.

Застосування розроблених систем охолодження повітря ГД з використанням холодопродуктивності, отриманої глибокою утилізацією в ЕХМ теплоти, що лишається після АБХМ, забезпечує зменшення питомої витрати палива ГД JMS 420 GS на 3...5 г/(кВт·год), тобто на 3...5 % залежно від кліматичних умов експлуатації. Оскільки додаткове обладнання, пов'язане з застосуванням ЕХМ зводиться до ежектора та двох пластинчатих теплообмінників тепловою потужністю приблизно 100 кВт, то термін його окупності не перевищує одного року.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

1. Обґрунтовано напрям підвищення ефективності охолодження повітря ГД за принципово нового підходу з використанням теплоти, що лишається після її перетворення в холод в АБХМ і сягає 30...40 %, шляхом її глибокої утилізації в ЕХМ у єдиному ланцюгу "утилізація зворотної теплоти після АБХМ в ЕХМ – охолодження повітря ГД.

2. За результатами моніторингу отримано дані щодо зменшення питомої витрати палива при зниженні температури зовнішнього повітря на вході радіатора системи оборотного охолодження повітря, виходячи з яких можна оцінювати ефект від охолодження надувного повітря ГД залежно від глибини охолодження, відповідно і необхідних витрат холодопродуктивності, зокрема холодопродуктивності ЕХМ, отриманої шляхом утилізації втрат теплоти зворотного теплоносія після АБХМ, і градієнтів як бустерних ступенів попереднього охолодження.

3. Показано, що застосування градирні мокрого типу як бустерного ступеня попереднього охолодження надувного повітря ГД забезпечує зменшення витрат холодопродуктивності ЕХМ у 1,5-2 рази, що дає можливість використовувати надлишок холодопродуктивності ЕХМ для охолодження повітря на вході ГД і технологічних потреб.

4. Розроблена система комплексного тепловикористання, що складається з двох підсистем – охолодження повітря ГД та глибокої утилізації зворотної теплоти після АБХМ в ЕХМ, є незалежною від режимів навантаження технологічних споживачів холоду і забезпечує високу паливну ефективність ГД – зменшення питомої витрати палива ГД JMS 420 GS на 3...5 г/(кВт·год), тобто на 2...3 %, залежно від кліматичних умов експлуатації.

5. Розроблена система охолодження повітря ГД доволі легко імплементується в традиційні установки автономного енергозабезпечення без істотних капітальних витрат, оскільки додаткове обладнання пов'язане із застосуванням конструктивно простих і дешевих ЕХМ. Термін окупності додаткове обладнання, пов'язаного з застосуванням ЕХМ (ежектора та двох пластинчатих теплообмінників), не перевищує одного року.

6. Результати дослідження у вигляді схемно-конструктивних рішень, методики розрахунку раціональних параметрів і рекомендацій з проектування системи утилізації теплоти ГД використані ТОВ "Хладотехніка" при розробці проекту холодопостачання ТОВ "Сандора", ПАТ "Завод "Екватор" при проектуванні та виготовленні теплообмінного обладнання та у навчальному процесі НУК імені адмірала Макарова.

Основні результати дисертації опубліковані в спеціалізованих виданнях:

1. Radchenko R., Radchenko A., Fordui S., Zubarev A., Andreev A., Konovalov D. Increasing fuel efficiency of gas engine by inlet air chilling In: M. Kruzel, W. Kuczyński (eds.) Contemporary Issues of Heat and Mass Transfer. Monography of the Faculty of Mechanical Engineering University of Technology Koszalin, 2019. pp. 641-662. Внесок здобувача: аналіз літературних джерел, розробка розрахункових схем, аналіз проведених розрахунків. Розділ в колективній **зарубіжній монографії**.

2. Radchenko A., Radchenko M., Konovalov A., Zubarev A. Increasing electrical power output and fuel efficiency of gas engines in integrated energy system by absorption chiller scavenge air cooling on the base of monitoring data treatment. // 17th International Conference Heat Transfer and Renewable

Sources of Energy HTRSE-2018, E3S 7u68jWeb of Conferences 70, 03011. – 2018. – 6 p. Внесок здобувача: розробка методики дослідження, розробка математичної моделі та аналіз отриманих даних. Стаття в науковому виданні, що входить до н.м.б. **Scopus, Web of Science**.

3. Radchenko M., Radchenko R., Ostapenko O., Zubarev A., Hrych A. Enhancing the utilization of gas engine module exhaust heat by two-stage chillers for combined electricity, heat and refrigeration. // 5th International Conference on Systems and Informatics, ICSAI 2018, Jiangsu, Nanjing, China, 2019. – P. 240-244. Внесок здобувача: розробка методики розрахунків, аналіз отриманих результатів. Стаття в науковому виданні, що входить до н.м.б. **Scopus**.

4. Radchenko A., Mikielewicz D., Forduy S., Radchenko M., Zubarev A. Monitoring the Fuel Efficiency of Gas Engine in Integrated Energy System. In: Nechyporuk M., Pavlikov V., Kritskiy D. (eds) Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering (ICTM 2019). Advances in Intelligent Systems and Computing (2020), vol 1113. Springer, Cham, pp.361-370. Внесок здобувача: аналіз літературних джерел, розробка методики розрахунків для визначення параметрів ефективності роботи двигуна, аналіз отриманих результатів. Стаття в науковому виданні, що входить до н.м.б. **Scopus, Web of Science**.

5. Trushliakov E., Radchenko A., Forduy S., Zubarev A., Hrych A. Increasing the Operation Efficiency of Air Conditioning System for Integrated Power Plant on the Base of Its Monitoring. In: Nechyporuk M., Pavlikov V., Kritskiy D. (eds) Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering (ICTM 2019). Advances in Intelligent Systems and Computing (2020), vol 1113. Springer, Cham, pp.351-360. Внесок здобувача: розробка методики розрахунків, аналіз отриманих результатів. Стаття в науковому виданні, що входить до н.м.б. **Scopus, Web of Science**.

6. Radchenko R., Radchenko N., Tsoy A., Forduy S., Zybarev A., Kalinichenko I. Utilizing the heat of gas module by an absorption lithium-bromide chiller with an ejector booster stage. AIP Conference Proceedings 2285, 030084 (2020) Внесок здобувача: аналіз літературних джерел, розробка методики розрахунків для визначення параметрів бромісто-літієвої холодильної машини, аналіз отриманих результатів. Стаття в науковому виданні, що входить до н.м.б. **Scopus, Web of Science**.

7. Forduy S., Radchenko A., Kuczynski W., Zubarev A., Konovalov D.: Enhancing the fuel efficiency of gas engines in integrated energy system by chilling cyclic air. In: Tonkonogiy V. et al. (eds.) Grabchenko's International Conference on Advanced Manufacturing Processes. InterPartner-2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham, pp. 500–509 (2020). Внесок здобувача: аналіз літературних джерел, розробка методики розрахунків, аналіз отриманих результатів. Стаття в науковому виданні, що входить до н.м.б. **Scopus**.

8. Радченко М. І., Трушляков Є.І., Кантор С.А., Портной Б.С., Зубарев А.А. Метод визначення теплового навантаження системи кондиціонування повітря за максимальним темпом приросту холодопродуктивності (на прикладі кондиціонування повітря енергетичного призначення). Авиационно-космическая техника и технология. – 2018. – № 4(148). – С. 44–48. Внесок здобувача: розробка методики розрахунків, аналіз результатів чисельного моделювання. Наукове фахове видання України

9. Радченко Р. М., Портной Б. С., Зубарев А.А., Кантор С. А.,Ткаченко В. С. Отримання і використання конденсату при охолодженні повітря на вході енергоустановки та проблема сепарації крапельної вологи з аерозольної суміші в градирнях. Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2018. № 5 (149). С. 23-28. Внесок здобувача: розробка методики розрахунків, аналіз результатів чисельного моделювання конденсації. Наукове фахове видання України

10. Радченко А. Н., Остапенко А. В., Грич А. В., Зубарев А.А. Повышение эффективности утилизации теплоты газового двигателя ступенчатой трансформацией Авіаційно-космічна техніка і технологія. 2018. № 6 (150). С. 39-44. Внесок здобувача: розробка методики розрахунків, аналіз результатів тривимірного чисельного моделювання. Наукове фахове видання України.

11. Трушляков Є.І., Радченко М.І., Зубарев А.А., Ткаченко В.С. Підхід до визначення складових теплового навантаження систем кондиціонування припливного повітря Холодильна техніка та технологія Refrigeration engineering and technology том 54, випуск 6, 2018г. с. 17-22. Внесок здобувача: розробка методики розрахунків, узагальнення та опрацювання отриманих даних. Наукове фахове видання України.

12. Трушляков Є.І., Радченко А.М., Зонмін Я., Зубарев А.А., Ткаченко В.С. Метод визначення холодопродуктивності установок кондиціонування повітря комфортного й енергетичного призначення. *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2019. – № 1 (153). – С. 53–58 Внесок здобувача: аналіз та обґрунтування визначення холодопродуктивності, узагальнення та опрацювання отриманих результатів розрахунків. Наукове фахове видання України.

13. Трушляков Є.І., Радченко А.М., Радченко М.І., Зонмін Я., Зубарев А.А., Ткаченко В.С. Холодопродуктивність системи кондиціонування зовнішнього повітря за поточним тепловим навантаженням. *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2019. – № 2 (154). – С. 51–55 Внесок здобувача: аналіз та обґрунтування визначення холодопродуктивності, узагальнення та опрацювання отриманих результатів розрахунків. Наукове фахове видання України.

14. Фордуй С.Г., Радченко А.М., Бойчук В.В., Зубарев А.А., Остапенко О.В. Резерви підвищення ефективності трансформації теплоти установки автономного енергозабезпечення. *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2019. – №4 (156). – С. 25-30. Внесок здобувача: аналіз та обґрунтування підвищення енергетичної ефективності, узагальнення та опрацювання отриманих результатів розрахунків. Наукове фахове видання України.

15. Трушляков Є.І., Радченко А.М., Фордуй С.Г., Зубарев А.А., Кантор С.А., Ткаченко В.С. Аналіз екологічної ефективності систем кондиціонування повітря комбінованого типу. *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2019. – № 5 (157). – С. 24–29. Внесок здобувача: аналіз та обґрунтування підвищення екологічної ефективності, узагальнення та опрацювання отриманих результатів розрахунків. Наукове фахове видання України.

16. Радченко А.М., Зубарев А.А., Фордуй С.Г., Бойчук В.В., Цуцман В.В. Аналіз ефективності охолодження повітря когенераційного газопоршневого модуля установки автономного енергозабезпечення. *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2019. – № 7 (159). – С. 76–80. Внесок здобувача: аналіз та обґрунтування підвищення ефективності охолодження, узагальнення та опрацювання отриманих результатів розрахунків. Наукове фахове видання України.

17. Радченко А.М., Зубарев А.А., Фордуй С.Г., Бойчук В.В., Коновалов А.В. Аналіз ефективності охолодження повітря на вході когенераційного газопоршневого модуля на часткових навантаженнях. *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2019. – № 8 (160). – С. 54–58. Внесок здобувача: аналіз та обґрунтування підвищення ефективності охолодження, узагальнення та опрацювання отриманих результатів розрахунків. Наукове фахове видання України.

Основні публікації, в яких додатково викладено зміст дисертації:

18. Зубарев А.А. Анализ эффективности систем технического кондиционирования воздуха на судах. Судовна енергетика: стан та проблеми: Матеріали IV міжнародної науково-технічної конференції студентів, аспірантів, науковців та фахівців. – Миколаїв: НУК, 2009. – с. 166-167.

19. Зубарев А.А. Гарус А.В. Анализ особенностей применения воздушной турбокомпрессорной холодильной машины на судах. Судовна енергетика: стан та проблеми: Матеріали IV міжнародної науково-технічної конференції студентів, аспірантів, науковців та фахівців. – Миколаїв: НУК, 2009. – с. 166-167. Внесок здобувача: постановка задачі дослідження, аналіз отриманих даних при чисельному моделюванні. Тези, усна доповідь.

20. Зубарев А.А. Еремін А.А. Анализ энергосберегающих технологий в системах кондиционирования воздуха. Проблемы экологии и энергосбережения в судостроении: Матеріали VI міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв: НУК, 2011. – с. 151-152. Внесок здобувача: постановка задачі дослідження, аналіз отриманих даних. Стаття, усна доповідь.

21. Зубарев А.А. Влияние биообрастания на снижение эффективности теплообмена Судовна енергетика: стан та проблеми: Матеріали V міжнародної науково-технічної конференції студентів, аспірантів, науковців та фахівців. – Миколаїв: НУК, 2011. – с. 98-99.

22. Чередниченко О.К., Зубарев А.А. Анализ характеристик вспомогательных блоков и функциональных подсистем пропульсивных систем AZIPOD. Судовна енергетика: стан та проблеми: Матеріали V міжнародної науково-технічної конференції студентів, аспірантів, науковців та фахівців. – Миколаїв: НУК, 2011. – с. 99-101. Внесок здобувача: огляд існуючого обладнання, розробка схемних рішень. Стаття, усна доповідь.

23. Зубарев А.А. Анализ способов осушения воздуха для консервации энергоустановок. Муниципальная энергетика: проблемы, решения: материалы IV международной научно-технической конференции. – Николаев: НУК, 2011. – с. 103-108.

24. Зубарев А.А. Современные способы осушения воздуха для консервации энергоустановок Холод в энергетике та на транспорті: Збірник наукових праць II міжнародної науково-технічної конференції. – Николаев: НУК, 2013. – с. 253-256.

25. Коробко В.В., Московко О.О., Зубарев А.А. Створення стенду для вимірювання комплексних показників матриць термоакустичних апаратів. Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: Матеріали V міжнародної науково-технічної конференції. – Николаев: НУК, 2014. – с. 223-226. Внесок здобувача: розробка схеми стенду, установка вимірювального обладнання. Стаття, усна доповідь.

26. Трушляков Є.І., Зубарев А.А., Маринець О.О. До вибору технічних рішень систем теплообору для геотермальних теплових насосів. Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні: Матеріали XI міжнародної науково-технічної конференції. – Николаев: НУК, 2016. – с. 103-108. Внесок здобувача: постановка задачі дослідження, розробка схемних рішень, аналіз отриманих результатів, формулювання висновків. Стаття, усна доповідь.

27. Зубарев А.А. Методи тепловологісної обробки повітря за допомогою термоакустичних технологій. Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті: Матеріали VIII міжнародної науково-технічної конференції. – Херсон: ХДМА, 2016. – с. 332-333.

28. Зубарев А.А. Анализ применения термоакустических технологий для тепловлажностной обработки воздуха. Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: Матеріали VII міжнародної науково-технічної конференції. – Николаев: НУК, 2016. – с. 165-166.

29. Трушляков Є.І., Радченко А.М., Стахель А.А., Зубарев А.А., Кантор С.А. Проектне теплове навантаження системи кондиціонування повітря і припущення річного споживання холоду. Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: Матеріали IX міжнародної науково-технічної конференції. – Николаев: НУК, 2018. – с. 207-208. Внесок здобувача: розробка схемо-конструктивних рішень, аналіз отриманих результатів розрахунків. Тези, усна доповідь.

30. Радченко А.М., Бутримович Д., Радченко М.І., Кантор С.А., Зубарев А.А., Ткаченко В.С., Портной Б.С. Реалізація резерву холодопродуктивності абсорбційно-ежекторної холодильної машини при охолодженні повітря на вході енергетичної установки. Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: Матеріали IX міжнародної науково-технічної конференції. – Николаев: НУК, 2018. – с. 211-213. Внесок здобувача: розробка схемо-конструктивних рішень, аналіз отриманих результатів розрахунків. Тези, усна доповідь.

31. Радченко Р.Н., Калиниченко И.В., Богданов Н.С., Зубарев А.А., Ефремов В.И. Эжекторная холодильная машина с бустерным тепловым насосом для охлаждения воздуха утилизацией теплоты судовой энергоустановки. Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: Матеріали IX міжнародної науково-технічної конференції. – Николаев: НУК, 2018. – с. 234-235. Внесок здобувача: розробка схемо-конструктивних рішень, аналіз отриманих результатів розрахунків. Тези, усна доповідь.

32. Radchenko R., Portnoi B., Kantor S., Zubarev A. Gas turbine unite inlet air cooling by using an excessive refrigeration capacity of absorption-ejector chiller in booster air cooler // T. Kujawa, A.A. Stachel, Z. Zapolovich. Book of Abstracts of the 17 International Symposium on Heat Transfer and Renewable Sources of Energy: HTRSE 2018. Szczecin, Poland. 2018. P. 133–134. Внесок здобувача: розробка схемо-конструктивних рішень, аналіз отриманих результатів розрахунків. Стаття, усна доповідь.

33. Radchenko R., Radchenko M., Ostapenko O., Zubarev A. Enhancing the transformation of gas engine module exhaust heat by two-stage absorption-adsorption chiller// X Minsk International Seminar “Heat Pipes, Heat Pumps, Refrigerators, Power Sources”, Minsk, Belarus, 10-13 September, 2018, pp. 463-467. Внесок здобувача: розробка схемо-конструктивних рішень, аналіз отриманих результатів розрахунків. Стаття, усна доповідь.

34. Mykola Radchenko, Roman Radchenko, Oleksii Ostapenko, Anatoliy Zubarev, Artem Hrych Enhancing the utilization of gas engine module exhaust heat by two-stage chillers for combined

electricity, heat and refrigeration. The 5th "International Conference on Systems and Informatics: ICSAI 2018", Jiangsu, Nanjing, China. Внесок здобувача: розробка схемо-конструктивних рішень, аналіз отриманих результатів розрахунків. Стаття, усна доповідь.

35. Трушляков Є. І., Горбов В. М., Мітенкова В. С., Зубарев А.А. Оцінка ефективності використання альтернативних палив на танкерах. Международная научно-практическая конференция FS-2019: Матеріали. Одесса – Стамбул – Одесса, 2019. – с. 38-47. Внесок здобувача: розробка схемо-конструктивних рішень, аналіз отриманих результатів розрахунків. Стаття, усна доповідь.

36. Трушляков Є.І., Радченко М.І., Зубарев А.А., Портной Б.С., Кантор С.А. Рациональное тепловое навантаження системи кондиціонування повітря за темпом прирощення річної холодопродуктивності. Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: Матеріали X міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв: НУК, 2019. – с. 423-426. Внесок здобувача: розробка схемо-конструктивних рішень, формулювання висновків. Тези, усна доповідь.

37. Трушляков Є.І., Радченко А.М., Ткаченко В.С., Зубарев А.А., Я. Зонмін, Фордуй С.Г. Визначення встановленої холодопродуктивності системи кондиціонування зовнішнього повітря за поточними тепловими навантаженнями. Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: Матеріали X міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв: НУК, 2019. – с. 447-452. Внесок здобувача: розробка методики розрахунків, аналіз отриманих результатів розрахунків. Тези, усна доповідь.

38. Радченко Р.М., Бойчук В.В., Остапенко О.В., Коновалов А.В., Зубарев А.А., Фордуй С.Г., Цуцман В.В. Дослідження ефективності охолодження повітря тригенераційної газопоршневої установки. Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: Матеріали X міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв: НУК, 2019. – с. 498-504. Внесок здобувача: розробка схемо-конструктивних рішень, формулювання висновків. Тези, усна доповідь.

39. Радченко Р.М., Бойчук В.В., Остапенко О.В., Коновалов А.В., Зубарев А.А., Фордуй С.Г. Оцінка ефективності охолодження повітря на вході тригенераційної газопоршневої установки на часткових навантаженнях. Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: Матеріали X міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв: НУК, 2019. – с. 525-531. Внесок здобувача: розробка схемо-конструктивних рішень, аналіз отриманих результатів. Стаття, усна доповідь.

40. Фордуй С.Г., Радченко А.М., Зубарев А.А., Бойчук В.В., Остапенко О.В. Підвищення ефективності утилізації теплоти у тригенераційній установці автономного енергозабезпечення. Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: Матеріали X міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв: НУК, 2019. – с. 531-539. Внесок здобувача: розробка схемо-конструктивних рішень, аналіз отриманих результатів. Стаття, усна доповідь.

41. Трушляков Е.И., Радченко А.Н., Зубарев А.А., Ткаченко В.С. Метод распределения тепловой нагрузки в системе кондиционирования приточного воздуха. Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: Матеріали X міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв: НУК, 2019. – с. 539-547. Внесок здобувача: розробка схемо-конструктивних рішень, аналіз отриманих результатів. Стаття, усна доповідь.

42. Трушляков Є.І., Радченко А.М., Грич А.В., Зубарев А.А., Ткаченко В.С., Я. Зонмін. Методологічний підхід до визначення холодопродуктивності систем кондиціонування повітря. Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: Матеріали X міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв: НУК, 2019. – с. 592-597. Внесок здобувача: розробка схемо-конструктивних рішень, аналіз отриманих результатів. Стаття, усна доповідь.

43. Трушляков Є.І., Радченко А.М., Фордуй С.Г., Зубарев А.А., Кантор С.А., Ткаченко В.С. Аналіз екологічної ефективності систем кондиціонування повітря комбінованого типу. Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: Матеріали XI міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв: НУК, 2020. – с. 442-445. Внесок здобувача: розробка схемо-конструктивних рішень, формулювання висновків. Тези, усна доповідь.

44. Forduy S., Radchenko A., Kuczynski W., Zubarev A., Kononov D. Enhancing the fuel efficiency of gas engines in integrated energy system by chilling cyclic air. Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: Матеріали XI міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв: НУК, 2020. – с. 546-552. Внесок здобувача: розробка схемо-конструктивних рішень, формулювання ви-

снівків. Тези, усна доповідь.

45. Mikielawicz D., Forduy S., Konovalov D., Radchenko M, Zubarev A. Monitoring the fuel efficiency of gas engine in integrated energy system. Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: Матеріали XI міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв: НУК, 2020. – с. 562-569. Внесок здобувача: розробка схемо-конструктивних рішень, формулювання висновків. Тези, усна доповідь.

46. Radchenko R., Radchenko A., Konovalov D., Zubarev A., Hrych A., Andreev A. Increasing fuel efficiency of gas engine by inlet air chilling. Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: Матеріали XI міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв: НУК, 2020. – с. 569-580. Внесок здобувача: розробка схемо-конструктивних рішень, аналіз отриманих результатів. Стаття, усна доповідь.

47. Радченко А.М., Грич А.В., Зубарев А.А., Остапенко О.В., Фордуй С.Г Система кондиціювання автономної теплоелектростанції підприємства харчової промисловості з двоступеневим охолодженням припливного повітря. Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: Матеріали XI міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв: НУК, 2020. – с. 606-608. Внесок здобувача: розробка схемо-конструктивних рішень, формулювання висновків. Тези, усна доповідь.

48. Радченко А.М., Остапенко А.В., Грич А.В., Зубарев А.А., Фордуй С.Г. Підвищення енергоефективності когенераційного модуля використанням ступеневої ежекторно-абсорбційна системи трансформації скидного тепла. Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: Матеріали XI міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв: НУК, 2020. – с. 611-613. Внесок здобувача: розробка схемо-конструктивних рішень, формулювання висновків. Тези, усна доповідь.

49. Радченко А.Н., Радченко Н.И., Цой А.П., Зубарев А.А., Фордуй С.Г Утилизация теплоты газового модуля абсорбционной бромистолитиевой холодильной машиной с эжекторной бустерной ступенью. Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: Матеріали XI міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв: НУК, 2020. – с. 616-624. Внесок здобувача: розробка методики розрахунків, формулювання висновків. Стаття, усна доповідь.

АНОТАЦІЯ

Зубарев А.А. Підвищення ефективності охолодження повітря газових двигунів бромистолітєвою холодильною машиною. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.14 – холодильна, вакуумна та компресорна техніка, системи кондиціювання. – Одеська національна академія харчових технологій, Одеса, 2021. Робота виконана в Національному університеті кораблебудування імені адмірала Макарова, Міністерства освіти і науки України.

Обґрунтовано підхід до підвищення ефективності традиційної системи охолодження повітря ГД в АБХМ шляхом глибокої утилізації в ЕХМ теплоти, що лишається після її перетворення АБХМ, у єдиному ланцюгу «утилізація зворотної теплоти після АБХМ в ЕХМ – охолодження повітря ГД». Розроблено способи раціональної організації процесів охолодження повітря ГД за сумісного використання холодопродуктивності градирні мокрого типу та холодопродуктивності, отриманої трансформацією теплоти зворотного теплоносія в ЕХМ, що забезпечують стабільно низьку температуру повітря і, як наслідок, зменшення споживання палива на 2...3 %.

Розроблено математичну модель для розрахунку характеристик системи трансформації відведеної від газових двигунів теплоти та визначення додаткової холодопродуктивності ЕХМ, отриманої шляхом утилізації теплоти зворотного теплоносія після АБХМ в ЕХМ.

Розроблена система комплексного тепловикористання, що складається з двох підсистем – охолодження повітря ГД та глибокої утилізації зворотної теплоти після АБХМ в ЕХМ, є незалежною від режимів навантаження технологічних споживачів холоду і забезпечує високу паливну ефективність ГД – зменшення питомої витрати палива ГД JMS 420 GS на 3...5 г/(кВт·год), залежно від кліматичних умов експлуатації.

Ключові слова: охолодження повітря, утилізація тепла, абсорбційна холодильна машина, ежекторна холодильна машина, газовий двигун.

SUMMARY

Zubarev A.A. Improving the efficiency of gas engine air cooling system with lithium-bromide chiller. - The qualification research work as a manuscript.

The dissertation for the scientific degree of the candidate of technical sciences on speciality 05.05.14 - Refrigeration, Vacuum and Compression Engineering, Air Conditioning Systems.- Odesa National Academy of Food Technologies, Odesa, 2021. The dissertation was completed at the Admiral Makarov National University of Shipbuilding.

The approach to increase the efficiency of the traditional GE air cooling system in ACh by deep utilization in ECh of the heat remaining after its ACh transformation in the single chain "utilization of return heat after ACh in ECh - GE air cooling" is substantiated. Methods of rational organization of GE air cooling processes with combined use of wet cooling tower cooling capacity and cooling capacity obtained by transformation of return coolant heat into ECh have been developed, providing stably low air temperature and, as a result, reduction of fuel consumption by 2...3%.

A mathematical model has been developed to calculate the characteristics of the heat transformation system of the heat removed from gas engines and to determine the additional cooling capacity of the ECh obtained by utilizing the heat of the return heat carrier after ACh in the ECh.

The developed system of complex heat utilization, consisting of two subsystems - cooling of GE air and deep utilization of return heat after ACh in ECh, is independent of load modes of technological consumers of cold and provides high fuel efficiency of GE - reduction of specific fuel consumption of GE JMS 420 GS at 3...5 g/(kWh), depending on climatic conditions of operation.

Key words: cooling air, heat recovery, absorption chiller, ejector chiller, gas engine