



НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ КОРАБЛЕБУДУВАННЯ
ІМЕНІ АДМІРАЛА МАКАРОВА

МАТЕРІАЛИ
VI МІЖНАРОДНОЇ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ
КОНФЕРЕНЦІЇ

СУЧАСНИЙ СТАН ТА ПРОБЛЕМИ ДВИГУНОБУДУВАННЯ

26–27 листопада 2020 р.

*ПРИСВЯЧЕНА 150-ЛІТТЮ ВІД ДНЯ НАРОДЖЕННЯ
НЕКРАСОВА ІВАНА СТЕПАНОВИЧА*



Видавний дім
«Гельветика»
2020

ОРГАНІЗАЦІЙНИЙ КОМІТЕТ:

Голова: Трушляков Євген Іванович проф. (UA)
Співголови: Nickolas J. Themelis (USA). Daifen Chen (China)

Заступники голови:

Сербін С. І. – д.т.н., проф. (UA); **Тимошевський Б. Г.** – д.т.н., проф. (UA);
Ткач М. Р. – д.т.н., проф. (UA); **Патлайчук В. М.** – к.т.н., доц. (UA)

Вчений секретар: Мінчев Д. С., доц. (UA)

Члени організаційного комітету

Мошенцев Ю. Л. – к.т.н., проф. (UA); **Ващіленко М. В.** – к.т.н., доц. (UA);
Гогоренко О. А. – к.т.н., доц. (UA)

С91

Сучасний стан та проблеми двигунобудування : Матеріали VI міжнародної науково-технічної конференції, присвяченої 150-літтю від дня народження Некрасова Івана Степановича, м. Миколаїв, 26–27 листопада 2020 р. – Миколаїв: Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, 2020. – 248 с.

ISBN 978-966-992-315-8

У збірнику представлено стислий виклад доповідей і повідомлень, поданих на VI міжнародну науково-технічну конференцію, присвячену 150-літтю від дня народження Некрасова Івана Степановича «Сучасний стан та проблеми двигунобудування», яка відбулася на базі Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова 26–27 листопада 2020 р.

УДК 621(063)

ЗМІСТ

НАПРЯМ 1. ПЛЕНАРНЕ ЗАСІДАННЯ

Иван Степанович Некрасов – основатель технического образования в г. Николаеве, трижды директор (к 150-летию со дня рождения)	
Наливайко В. С., Гогоренко А. А.	9

Исследование свободных колебаний рабочих лопаток турбины ГТД расчетно-экспериментальным методом	
Ткач М. Р., Кулишов С. Б., Моргун С. А., Полищук В. А., Золотой Ю. Г., Галинкин Ю. Н., Проскурин А. Ю., Ключник В. С.	14
Термохімічні технології – шлях підвищення енергоефективності енергетичних установок високотехнологічних суден	
Чердніченко О. К.	21

НАПРЯМ 2. ЗАГАЛЬНІ ПИТАННЯ ДВИГУНОБУДУВАННЯ

Концепція застосування споруд типу «Зимовий сад»	
Анастасенко С. А., Димо Б. В.	26

Підвищення експлуатаційних показників судових СОД при використанні водню в якості палива	
Гуглев О. О., Прасолов Р. О., Трасковский Є. П., Марченко А. М.	29

Исследование котельного экономайзера термосифонного типа	
Елифанов А. А., Дымо Б. В., Долганов Ю. А., Анастасенко С. М.	33

Питання стану аварійності судового обладнання	
Кісстов Ю. В., Кукліна О. Ю., Шумаков Д. С.	38

Застосування високоефективних систем охолодження – як дієвий шлях поліпшення параметрів паливної економічності і токсичних вихлопних газів судових двигунів	
Клюсов В. Ю., Хайленко Е. Д., Буханець А. О., Кумарянський О. М., Мірошник М. Д.	43

Очищення палива від сірки за допомогою електрогідрравлічної обробки палива	
Кравченко Д. Г., Дьяконов В. М., Животов М. О., Козінов М. М.	45

Перспективні схеми приготування та використання водопаливних емульсій в поршневих ДВЗ	
Личко Б. М., Проскурін А. Ю., Шульгін І. Г., Черкасов О. В., Галузинський А. І.	48

Основні напрямки екологізації ДВЗ

Мисько В. О., Скрепець А. К., Белей А. О., Петрова Я. О..... 51

Формирование рациональных схем систем охлаждения
судовых двигателей

**Мошенцев Ю. Л., Гогоренко А. А.,
Пироженко В. А., Викторова М. А. 55**

Підвищення ефективності СЕУ застосуванням спиртових палив в ДВЗ

Петров С. О., Андронов В. Г., Гненний Г. Г. 59

Огляд методу озонування наддувочного повітря двигуна внутрішнього
згоряння як способу поліпшення його екологічних показників

Пирисунько М. А., Бабаков Ю. А., Гордієнко А. О., Щербина В. О..... 63

Огляд методів діагностики суднового двигуна внутрішнього згоряння

**Пирисунько М. А., Конюшенко Є. Ю.,
Трофімов Д. Ю., Тімановський М. В. 66**

Огляд методів зменшення токсичних викидів у відпрацьованих газах
суднових двигунів внутрішнього згоряння

Пирисунько М. А., Вдовиченко Д. О., Сургаєв А. В. 69

Шкідливі речовини у відпрацьованих газах суднових ДВЗ
та їх вплив на двигунобудування

**Пирисунько М. А., Курчицький Р. М.,
Савінкін І. А., Данильченко М. В. 72**

Аналіз зменшення димності та токсичності відпрацьованих газів
шляхом керованої подачі повітря до камери згоряння ДВЗ

**Пирисунько М. А., Степановський М. Ю.,
Кремень Д. Д., Кутузов П. В. 76**

Використання вторинних енергоресурсів
в судновому енергетичному обладнанні

Пирисунько М. А., Вдовиченко Д. О., Кудренко А. Є..... 79

Аналіз перспективних конструкцій форсунок суднових ДВЗ

**Проскурін А. Ю., Личко Б. М., Заболотня Ю. В., Чорнобровий П. С.,
Саприкін О. О., Деменко М. М. 83**

Сучасні способи модернізацій ПНВТ суднових ДВЗ

**Проскурін А. Ю., Личко Б. М., Москов А. Ю., Лавренюк В. Р.,
Шепель Р. В., Уфімцев Д. С. 86**

Современные способы усовершенствования агрегатов наддува судовых дизелей

**Проскурин А. Ю., Личко Б. М., Сташевский В. А.,
Сибий Р. В., Попов П. Н. 89**

Основи використання технології EGR в судових малооборотних двигунах
Репін С. С., Сухенко Л. П., Кургузов С. М. 92

Анализ работы термопрессора для снижения эмиссии оксидов азота в судовых ДВС

Смоляная А. А., Шамрин С. И., Дивуха В. П. 95

Термічна переробка полімерних відходів з отриманням рідкого палива і супутніх вуглецевих матеріалів

Тимошевський Б. Г., Шалапко Д. О., Шалапко І. О. 98

Підвищення ефективності СЕУ шляхом утилізації вторинних енергоресурсів

Тімуш В. А., Родін О. Є. 102

Підвищення ефективності використання моторного палива в ДВЗ за рахунок його конверсії

Уваров В. А., Маханько О. В., Хоменко В. С., Челпанов А. О. 107

Підвищення контролепридатності системи очищення повітря авіаційного поршневого двигуна

Ушаков В. В., Шарабайко О. М., Рагулін С. В. 111

Використання багаторівневої класифікації при опису структурних схем головних енергетичних установок суден різного функційного призначення

**Чередніченко О. К., Вільчинський М. Ю.,
Пекарський К. В., Косар П. С., Малоштан О. О. 113**

Огляд способів використання водню в двигунах внутрішнього згорання

**Шалапко І. О., Тимошенко М. М.,
Поздняков Д. І., Якушевський О. О. 116**

НАПРЯМ 3. РОБОЧІ ПРОЦЕСИ В ДВИГУНАХ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ ТА УСТАНОВКАХ

Аналіз передумов розробки схеми утилізації низькотемпературних ВЕР судових систем регазифікації аміаку термоакустичними тепловими машинами

Бумаченко В. Б. 120

Аналіз спектра віброакустичного сигналу турбокомпресора високообертного дизельного двигуна Варбанець Р. А., Мінчев Д. С., Чалий Д. П.	124
Переваги застосування гібридних дизель-електричних енергетичних установок на пасажирських лайнерах Голешин Є. В.	130
Формування системи теплової підготовки транспортного засобу, працюючого на зрідженому газовому паливі Грицук І. В., Погорлецький Д. С., Симоненко Р. В., Білай А. В., Котов А. І.	133
Контролювання параметрів електронної системи керування подачі палива для зменшення токсичних викидів відхідних газів ДВЗ Калініченко І. В., Бірюков І. М., Шмаков С. І., Терещенко М. С.	137
Система очищення відпрацьованих газів двигунів внутрішнього згоряння Корнієнко В. С., Приходько Д. В.	143
Повышение компактности энергетических установок совершенствованием теплогидравлической эффективности процессов переноса теплоты в их элементах Кузнецов В. В.	148
Дослідження змін екологічно небезпечних викидів дизельних енергетичних установок суден типу Panamax Кузнецова С. А., Розворенко В. В., Герасименко Б. О.	152
Експериментальні дослідження ефективних показників роторно-поршневого двигуна Митрофанов О. С., Проскурін А. Ю., Познанський А. С.	155
Аналіз сучасних систем паливоподачі середньооберткових суднових двигунів внутрішнього згоряння Митрофанов О. С., Ворошило С. В., Козаченко В. В.	159
Повышение эффективности дизельных установок при использовании комбинированных котлов с интенсифицированными поверхностями Михайлик А. Ю., Басилашвили Нодар	162
Двигун Стірлінга для утилізації тепла відхідних газів ДВЗ Мінчев Д. С., Пономарьов Д. О.	165
Система комбінованого наддуву для дизельного двигуна швидкісного катеру Мінчев Д. С., Бухарін А. А.	168

Використання впускного ресиверу зі змінною довжиною впускних патрубків для автомобільного двигуна Мінчев Д. С., Яровенко В. А.	171
Робота головного суднового малообертного двигуна за динамічною гвинтовою характеристикою на малих навантаженнях Мінчев Д. С., Пігур С. В.	175
Вплив параметрів регулятора на динамічні навантажувальні характеристики суднового дизель-генератора Мінчев Д. С., Юр'єв А. В.	179
Зміна об'єму міжпоршневої порожнини циліндра двотактного дизеля Д100 Наливайко В. С., Авдюнін Р. Ю., Байраченко І. В., Мустафєв Т. М.	183
Розрахункове дослідження динамічних властивостей вітчизняного легкового автомобіля Осетров О. О., Стеблиць В. А.	186
Вплив параметрів автомобіля на його динамічні якості Стеблиць В. А., Осетров А. А.	189
Аналіз використання альтернативного виду палива в дизельних двигунах Тимошевський Б. Г., Митрофанов О. С., Нечипуренко Б. С., Чаплінський Ю. І.	193
Огляд турбокомпаундних систем утилізації тепла сучасних двигунів внутрішнього згорання Фінко Ю. В.	196
НАПРЯМ 4. РОБОЧІ ПРОЦЕСИ В ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНАХ ТА УСТАНОВКАХ	
Дослідження силової турбіни контактної газотурбінної установки потужністю 16 МВт Афонін М. О., Чапайло А. В.	198
Новий підхід до геометричного моделювання профілю лопатки осевої турбіни Борисенко В. Д., Устенко С. А., Устенко І. В.	201
Теоретичні дослідження утворення токсичних компонентів в двопаливній низькоемісійній камері згорання ГТД при роботі на газоподібному та рідкому паливах Діасамідзе Б. Т.	205

Аналіз ефективності застосування аеротермопресорного апарату при контактному охолодженні повітря газотурбінних двигунів Кобалава Г. О., Левицький Є. С.	210
Визначення коефіцієнтів місцевих опорів в проточній частині аеротермопресорного апарату Кобалава Г. О., Федосєєв Р. М.	213
Ефективність парогазової установки з низьконапорним парогенератором на основі газотурбінного двигуна потужністю 25 МВт Патлайчук В. М., Колісник І. А.	216
Теоретичні дослідження утворення токсичних компонентів в камері згоряння ГТД «Водолій» при роботі на рідкому паливі Сербін С. І., Діасамідзе Б. Т., Георгіу В. В.	220
Теоретичні дослідження утворення токсичних компонентів в камері згоряння ГТД «Водолій» при роботі на супутньому нафтовому газі Сербін С. І., Діасамідзе Б. Т., Крикличенко О. В.	225
НАПРЯМ 5. КОНСТРУКЦІЯ ТА МІЦНІСТЬ ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ ТА ДВИГУНІВ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ	
Конструктивні особливості найбільшого і найпотужнішого дизеля у світі Wartsila – Sulzer RTA96-с (ДКРН96/250) Очеретнюк А. В., Рижов І. В.	230
Вплив початкових параметрів на вихідні показники штовхача для кулачка, отриманого за методикою «Полідайн» Пліш О. В., Пашковський В. Р., Гнилозуб Р. І.	234
НАПРЯМ 6. ІННОВАЦІЇ В СИСТЕМІ ПІДГОТОВКИ ІНЖЕНЕРНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ФАХІВЦІВ	
Integrated electric discharge technologies as response to modern challenges of civilization and platform for advanced training of mechanical engineering specialist Gutsalenko Yu. G., Iancu C. G., Rucki M.	238
Вища технічна освіта України і загроза енергетичної безпеки Семенов М. М., Проскурін А. Ю.	242
Електронний навчальний курс як важлива складова дистанційного навчання студентів технічних спеціальностей Сорокіна Т. М.	244

ЕФЕКТИВНІСТЬ ПАРОГАЗОВОЇ УСТАНОВКИ З НИЗЬКОНАПОРНИМ ПАРОГЕНЕРАТОРОМ НА ОСНОВІ ГАЗОТУРБІННОГО ДВИГУНА ПОТУЖНІСТЮ 25 МВт

Патлайчук В. М.

*кандидат технічних наук, доцент,
завідувач кафедри турбін
Національного університету кораблебудування
імені адмірала Макарова*

Колісник І. А.

*студент VI курсу
Машинобудівного навчально-наукового інституту
Національного університету кораблебудування
імені адмірала Макарова
м. Миколаїв, Україна*

Одним з сучасних типів парогазової установки є установка з низьконапорним парогенератором [1]. У цій установці газ, що відходить після газотурбінного двигуна, скидається в топку звичайного котла і за рахунок кисню, що міститься в них (коефіцієнт надлишку повітря після камери згоряння газотурбінного двигуна значний, зазвичай більше трьох), використовуються для спалювання палива в топці котла. Оскільки димососи у таких котлів відсутні, то тиск газу в ньому виявляється незначно вище атмосферного, а цей котел називають «низьконапорним парогенератором» (НПГ). Тому й установка носить назву «парогазової установки з низьконапорним парогенератором», а її позначення скорочено буде «ПГУ з НПГ».

У ПГУ з НПГ паливо підводиться як в камері згоряння газотурбінного двигуна, так і в парогенераторі. У літературі цю установку іноді також називають «ПГУ зі скиданням» або «ПГУ скидного типу» [2].

Конструктивно низьконапорний парогенератор мало відрізняється від звичайних котлів, тому може працювати на різних видах палива, в тому числі і на твердому. По розташуванню обладнання в цій схемі газотурбінний двигун є як би надбудовою паротурбінної установки, тому така схема широко використовується для реконструкції паротурбінних установок, які працюють на знижених параметрах пари.

Відомо, що при спалюванні палива в повітрі вміст кисню в цьому повітрі стрімко зменшується. Тому вміст кисню у випускних газах газотурбінного двигуна менше, ніж в атмосферному повітрі, де він становить 21%. Внаслідок експериментальних досліджень встановлено,

що ефективне спалювання палива в низьконапорному парогенераторі буде відбуватися лише тоді, коли вміст кисню в газах не буде меншим, ніж 15% при спалюванні природного газу, 16% при спалюванні рідкого палива та 17% при спалюванні твердого палива. Якщо вміст кисню у випускних газах газотурбінного двигуна є меншим, ніж потрібно, тоді необхідно за допомогою додаткового вентилятора прокачувати в топку парогенератора певну кількість повітря з атмосфери.

Метою проведеного дослідження було визначення впливу початкових параметрів газу газотурбінного двигуна на ефективність та показники парогазової установки з низьконапорним парогенератором, створеної на основі газотурбінного двигуна потужністю 25 МВт.

Передбачалося використання низьконапорного парогенератора з П-подібним компонуванням та природньою циркуляцією робочого тіла. Слід зауважити, що на відміну від традиційних парогенераторів низьконапорний парогенератор не має пакета труб для підігріву повітря, яке йде з атмосфери до топки. (Даний пакет розташовується в парогенераторі останнім за рухом газів.) Натомість останнім за рухом газів розташований газовий водопідігрівач, який у даній схемі може розглядатися як перша частина економайзера. Після газового водопідігрівача газу викидаються у атмосферу.

У розглянутій парогазовій установці парова і газова турбіни приводять у обертання кожна свій генератор електричного струму.

Теплова схема парогазової установки не передбачала проміжний перегрів пари у парогенераторі.

Тепловий розрахунок парогазової установки проводився відповідно до розробленої методики при деяких змінних початкових параметрах газу в газотурбінному агрегаті. Дискретно варіювалися температура газу перед газовою турбіною (від 1100 до 1500 К) та міра підвищення тиску у компресорі (від 5 до 25).

При розрахунку були використані рекомендації, наведені у роботах [3] та [4].

У всіх варіантах розрахунок проводився для однакової потужності газотурбінного агрегата на клеммах генератора 25 МВт [5], [6]. У ролі палива як в газотурбінному агрегаті, так і в парогенераторі використовувався природний газ з теплотворною здатністю 50 032 кДж/кг.

Розрахунок параметрів паротурбінного блоку проводився в усіх варіантах для генерації пари тиском 12,8 МПа (130 кгс/см²) та температурою 535 °С. Тиск в конденсаторі приймався рівним 4 кПа (температура конденсації – 29 °С), температура живильної води на вході в парогенератор становила 235 °С. Кількість регенеративних теплообмінників дорівнювала 5.

Результати проведенного дослідження свідчать про те, що:

1) Ефективність парогазової установки з низьконапорним парогенератором при розглянутих вихідних даних становила 0,403...0,423. Менші значення характерні для температури газу перед газовою турбіною 1100 К, більші значення – для температури 1500 К. Порівняно з аналогічними показниками ПГУ з утилізацією тепла ці показники є суттєво меншими.

2) Залежність ККД парогазової установки від міри підвищення тиску у компресорі має оптимум (максимум). В розглянутому діапазоні значень вихідних параметрів він лежить в межах від 10 до 22. У порівнянні з аналогічною залежністю для газотурбінного агрегата (ГТА) простого циклу даний графік, по-перше, є більш пологим, тому відхилення від оптимуму ведуть до меншого погіршення ККД, а по-друге, оптимальні значення міри підвищення тиску є дещо меншими, що спрощує конструкцію компресора газотурбінного агрегата.

3) Збільшення температури газу перед газовою турбіною веде як до збільшення ККД газотурбінного агрегата, так і до збільшення ККД паротурбінної частини установки. Через що зростає і ККД парогазової установки в цілому.

4) Ефективність паротурбінної частини установки зі збільшенням міри підвищення тиску у компресорі газотурбінного агрегата зменшується. Це пояснюється її суттєвою залежністю від температури випускних газів цього агрегата, яка залежить від міри підвищення тиску аналогічним чином. При температурі випускних газів менше, ніж 600 К, ККД паротурбінної частини ПГУ з НПГ майже нічим не відрізняється від ККД паротурбінної установки без впуску газів з газової турбіни.

5) При фіксованій потужності газотурбінного агрегата (25 МВт) залежність потужності паротурбінної частини установки (а отже і потужності ПГУ в цілому) від міри підвищення тиску у компресорі ГТА має мінімум. При цьому оптимальні значення міри підвищення тиску майже співпадають зі значеннями цього параметра для залежності від нього ККД парогазової установки. Це пояснюється впливом на потужність паротурбінної частини температури і кількості випускних газів газотурбінного агрегата.

6) При прийнятих вихідних параметрах доля потужності газотурбінного агрегата в сумарній потужності парогазової установки становить від 12 до 21%. Більші значення – для більшої температури газів перед турбіною ГТА.

7) Додаткова кількість атмосферного повітря, яке подається в топку парогенератора для збільшення вмісту кисня (до 15%) у робочому тілі, залежить від марки використовуваного палива та від надлишку повітря у

камері згоряння ГТА. Для прийнятих вихідних даних додаткове повітря слід подавати в парогенератор при значеннях коефіцієнта надлишку повітря, меншим ніж 3,65. Коефіцієнт надлишку повітря в камері згоряння газотурбінного агрегата зменшується зі збільшенням температури газів на виході з цієї камери та зі зменшенням міри підвищення тиску у компресорі.

8) У розглянутому діапазоні вихідних параметрів доля додаткового повітря у сумарній кількості робочого тіла парогенератора може досягати 37%.

9) Залежність паропродуктивності парогенератора від міри підвищення тиску аналогічна залежності потужності паротурбінної частини установки від цього параметра і пояснюється тими же причинами.

Література:

1. Арсеньев Л.В., Тырышкин В.Г. Комбинированные установки с газовыми турбинами. Л. : Машиностроение, 1982. 247 с.

2. Цанев С.В., Буров В.Д., Ремезов А.Н. Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций. М. : Издательский дом МЭИ, 2009. 584 с.

3. Установки парогазовые стационарные. Методика расчета тепловых схем установок и высоконапорных парогенераторов. РТМ 108.020.22–84. Л. : Изд-во НПО ЦКТИ, 1985. 56 с.

4. Тепловой расчет котла (нормативный метод) / под ред. С.И. Мочан, А.А. Абрютина, Г.М. Кагана и В.С. Назаренко. С.-Петербург : Изд-во НПО ЦКТИ, 1998. 258 с.

5. Романовський Г.Ф., Сербін С.І., Патлайчук В.М. Сучасні газотурбінні агрегати: у 2 т. Т. 1: Агрегати виробництва України та Росії. Миколаїв : Вид-во НУК, 2005. 344 с.

6. Романовський Г.Ф., Сербін С.І., Патлайчук В.М. Газотурбінні агрегати: у 2 ч. Ч. 1: Загальна будова та класифікація. Миколаїв : Вид-во НУК, 2016. 216 с.