

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»**

**ХАМЗА АЛІ АДЕЛ ХАМЗА**



УДК621.43.06:621.436

**ВИБІР ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ  
ДИЗЕЛЬ-ЕЛЕКТРИЧНОЇ СТАНЦІЇ З СИСТЕМОЮ  
УТИЛІЗАЦІЇ ТЕПЛОТИ**

Спеціальність 05.05.03 – двигуни та енергетичні установки

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків – 2017

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі двигунів внутрішнього згоряння Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник доктор технічних наук, професор  
**Марченко Андрій Петрович,**  
Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»,  
проректор з наукової роботи

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
**Тимошевський Борис Георгійович,**  
Національний університет кораблебудування  
ім. адмірала Макарова, м. Миколаїв,  
завідувач кафедри двигунів внутрішнього згоряння

доктор технічних наук, професор  
**Грицук Ігор Валерійович,**  
Харківський національний автомобільно-дорожній  
університет, м. Харків,  
доцент кафедри технічної експлуатації і  
сервісу автомобілів

Захист відбудеться «31» жовтня 2017 р. о 13<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.13 в Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2, кафедра двигунів внутрішнього згоряння, ауд. 11.

З дисертацією можна ознайомитися у науково-технічній бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2.

Автореферат розісланий «28» вересня 2017 п.

Вчений секретар  
спеціалізованої Вченої ради



Ребров О.Ю.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність дослідження.** Ефективність виробництва, темпи науково-технічного прогресу, раціональне використання паливних ресурсів все в більшій мірі залежить від стану паливно-енергетичного комплексу країни. Важливою складовою паливно-енергетичного комплексу, наряду з електроенергетикою, є двигуни внутрішнього згорання (ДВЗ). Тому основним напрямком у підвищенні економії палива і екологічної безпеки слід вважати більш повне використання енергії палива, яке спалюється саме у двигунах внутрішнього згорання. Це забезпечується не тільки підвищенням ККД двигуна, але й використанням його вторинних енергоресурсів, до яких належать теплота відпрацьованих газів (ВГ) двигуна, теплота систем охолодження двигуна(мастила та води) та ін. В цілому ці втрати в навколишнє середовище можуть досягати 50 - 70% загального тепла від спалювання палива.

Основні втрати тепла в двигуні внутрішнього згорання зумовлені високою температурою відпрацьованих газів і необхідністю охолодження циліндрів двигуна. При цьому, кількість тепла, що втрачається з відпрацьованими газами та з охолоджувальною рідиною приблизно рівні.

В даний час досить добре досліджені методи зниження втрат теплоти ДВЗ з відпрацьованими газами. Проте методи зниження втрат тепла з охолоджувальною рідиною вивчені недостатньо в зв'язку з невисоким рівнем температури рідини в системі охолодження двигуна.

Одним з найбільш перспективних напрямків рекуперації тепла охолоджуючої рідини в ДВЗ є застосування органічного циклу Ренкіна (ОЦР). В якості робочого тіла в ОЦР можуть використовуватися хладони, пропан, бутан та інші органічні речовини, що мають невисоку температуру кипіння при нормальних умовах. Проте, низька теплота пароутворення вказаних органічних речовин веде до високих масо-габаритними показників обладнання ОЦР. Крім того, дані органічні речовини негативно впливають на екологію навколишнього середовища. Це в значній мірі перешкоджає широкому поширенню органічного циклу Ренкіна в системах рекуперації тепла двигунів внутрішнього згорання.

Важливо відзначити, що найбільшого поширення в системах рекуперації тепла відпрацьованих газів ДВЗ отримали цикли Ренкіна на воді. Це обумовлено тим, що вода є більш дешевою у порівнянні з наведених вище органічних речовин та екологічно чистою, а теплота пароутворення води в 6-10 разів більша. Це дозволяє створювати компактне обладнання рекуперації теплоти відпрацьованих газів двигунів внутрішнього згорання. Необхідно відзначити, що теплота, яка втрачається з охолоджувальною рідиною, частіше не використовується в циклах Ренкіна на воді.

Тому дослідження, які направлені на розробку системи рекуперації теплоти, що втрачається в двигунах внутрішнього згорання на основі циклу Ренкіна, який використовує комплексно теплоту відпрацьованих газів та системи охолодження є актуальними.

**Мета і задачі дослідження.** Метою дисертаційного дослідження є вибір і обґрунтування параметрів дизель-електричної станції з системою утилізації теплоти відпрацьованих газів та системи охолодження дизеля з використанням циклу Ренкіна.

Для досягнення поставленої мети в роботі визначено такі основні задачі:

1. Аналіз технологічних схем систем рекуперації вторинної теплоти в двигунах внутрішнього згоряння. Визначення раціональної схеми утилізації вторинної теплоти відпрацьованих газів та охолоджуючої рідини в умовах Іраку.

2. Розробка оптимальної технологічної схеми циклу Ренкіна, у якому використовується теплота відпрацьованих газів та системи охолодження.

3. Розробка математичної моделі системи рекуперації вторинної теплоти двигуна Hyundai H25/33 за циклом Ренкіна, у якому використовується теплота відпрацьованих газів та системи охолодження.

4. Розрахункове дослідження утилізаційної установки рекуперації вторинної теплоти ДВЗ, що використовує теплоту відпрацьованих газів і теплоту системи охолодження двигуна.

5. Розробка рекомендацій, щодо вибору параметрів дизель-електричної станції з системою утилізації вторинної теплоти дизеля.

*Об'єкт дослідження* – процеси тепло і масообміну та параметри робочих тіл системи утилізації двигуна Hyundai engine H25/33.

*Предмет дослідження* – параметри та характеристики процесів теплообміну в обладнанні системи рекуперації теплоти відпрацьованих газів і системи охолодження двигуна Hyundai H25/33; технологічні схеми рекуперації вторинної теплоти двигуна Hyundai H25/33.

**Методи дослідження.** Дисертаційне дослідження базується на фундаментальних положеннях термодинаміки та теорії двигунів внутрішнього згоряння. Дослідження процесів перетворення енергії в роботу, передачі енергії від одного робочого тіла до іншого виконані на основі термодинамічних методів. Розрахункові дослідження визначення параметрів робочого тіла утилізаційного комплексу отримано апроксимацією експериментальних даних та даних літературних джерел за методами найменших квадратів та планування експерименту.

З використанням розробленої математичної моделі теплоенергетичного об'єкта на основі методу кінцевих елементів виконаний розрахунок середніх температур в системі тіл та потоків теплоносіїв, що знаходяться у взаємному теплообміні.

Для порівняльної оцінки ефективності інвестиційних проектів дизельних електростанцій з утилізаційним комплексом вторинної теплоти двигуна використано метод NPV (Net Present Value).

**Наукова новизна отриманих результатів:**

1. Вперше запропоновано схема комплексної системи утилізації вторинної теплоти дизель-електричної станції з додатковим отриманням електроенергії, теплоти для підігріву важкого палива, конденсації технічної води з відпрацьованих газів двигуна, що дозволяє підвищити ефективність когенераційної установки.

2. Запропоновано нове схематичне рішення комбінованої двостадійної системи нагріву важкого палива двигуна когенераційної установки з частковим використанням теплоти системи охолодження або теплотивідпрацьованих газів для отримання пару в котлі-утилізаторі з подальшим його використанням для підігріву цього палива.

**Практичне значення отриманих результатів** для двигунобудування полягає у наступному:

1. Запропоновано та обґрунтовано конструктивні рішення утилізаційного комплексу, що дозволяє з мінімальними втратами виконати модернізацію існуючих дизельних електростанцій з метою отримання додатково близько 10% потужності та до 2300 кг на добу конденсату водяної пари.

Результати дисертаційної роботи рекомендовано до впровадження на дизельній енергетичній станції у Аль-Жадрия в Іраку, а також використовуються в навчальному процесі й наукових дослідженнях на кафедрі двигунів внутрішнього згоряння НТУ «ХП».

**Особистий внесок здобувача.** Всі основні результати дисертаційного дослідження одержані здобувачем особисто. Серед них: проведений аналіз літературних джерел щодо методів і технологічних схем рекуперації теплоти відпрацьованих газів і системи охолодження ДВЗ, розроблені методики досліджень технологічної схеми рекуперації теплоти ДВЗ на основі відкритого циклу Ренкіна, математичні моделі обладнання системи рекуперації тепла; отримані результати експериментально-розрахункових досліджень процесів тепло- і масообміну в обладнаннях системи рекуперації теплоти двигуна Hyundai H25/33, зроблені рекомендації з модернізації існуючих Diesel Power Plants, що використовують в якості силової установки двигуни Hyundai H25/33.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення та результати дисертаційного дослідження доповідалися на: XIX Міжнародному конгресі двигунобудівників (с. Коблево, 2014), Всеукраїнській науково-технічній конференції «Проблеми розвитку регіону: промисловий і економічний аспект» (м. Первомайськ, 2016)

**Публікації.** Основний зміст дисертації відображено у 10 наукових працях, з яких: 4 статті в наукових фахових виданнях України, 2 – у закордонних періодичних фахових виданнях, 1 патент України на корисну модель та 1 патент Іраку, 2 – у матеріалах конференцій.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається з анотації на двох мовах, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків. Загальний обсяг дисертаційної роботи становить 286 сторінок, з них 85 рисунків за текстом; 2 рисунки на 2 окремих сторінках, 21 таблиць за текстом, 1 таблиця на 4 окремих сторінках, список з 89 найменувань використаних джерел на 12 сторінках, 12 додатків на 56 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність дослідження, розглянуто стан проблеми, сформульовано мету та основні задачі дослідження, зазначено шляхи їх

вирішення, наведено інформацію про наукову новизну та практичну цінність роботи, визначено особистий внесок здобувача в одержані результатів досліджень, представлені відомості, щодо апробації результатів дослідження.

У **першому розділі** виконано аналіз, узагальнення та систематизацію світового досвіду утилізації вторинних енергоресурсів ДВЗ, обґрунтовані мета та задачі дослідження.

Проаналізовано проблеми вторинного використання теплоти ДВЗ. Аналіз даних показує, що енергія палива, яке потрапляє в циліндр двигуна розподіляється на основні групи: корисна теплота, яка перетворюється в індикаторну роботу двигуна  $\eta_i$  (21-50%); втрати з охолоджувальною рідиною  $Q_{охл}$  (12-35%); втрати з відпрацьованими газами  $Q_r$  (25-55%); втрати на охолодження мастила, втрати тепла від нагрітого корпусу двигуна та інші невраховані втрати  $Q_\Sigma$  (2-10%). Тобто, втрати вторинної теплоти можуть становити від 55 до 72% від теплоти згорання палива  $Q_T$ . Це зумовлює актуальність проблеми вторинного використання теплоти двигунів внутрішнього згорання при неухильному зростанні продажу дизель-генераторів у всьому світі.

Актуальність досліджень технологічних циклів утилізації тепла двигунів внутрішнього згорання підкреслюється даними по прогнозу Інформаційного Агенства Енергетики США щодо розвитку когенераційних установок на основі дизель-генераторів у різних країнах світу (рис. 1).

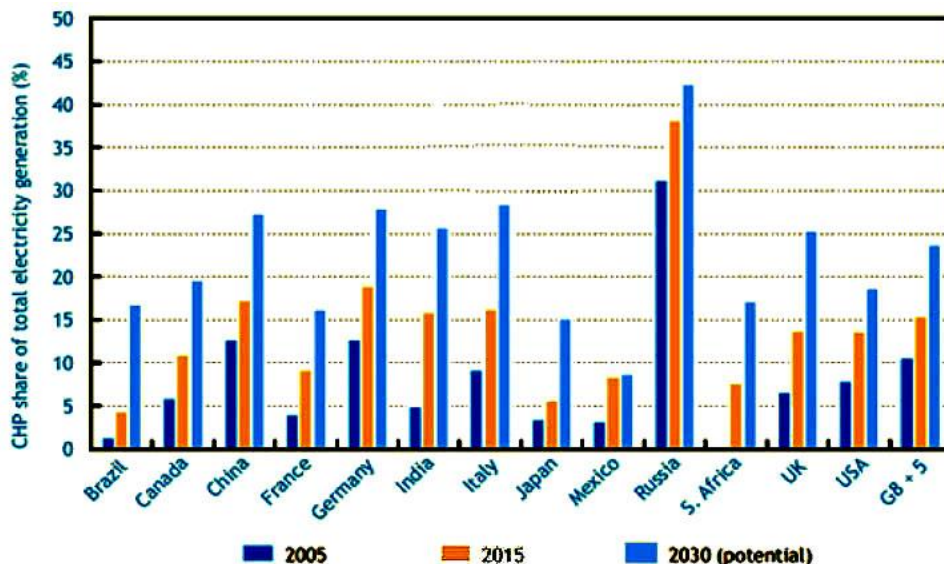


Рисунок 1 – Розвиток когенераційних установок на основі дизель-генераторів у різних країнах світу

Згідно рис. 1 у різних країнах світу відбувається зростання попиту на когенераційні установки. Крім того, якщо для країн, розташованих в холодних кліматичних зонах розвивається напрямок одночасної генерації електроенергії і тепла (когенерація), то для Іраку, розташованого в теплій і посушливій кліматичній зоні, доцільним стає рішення наступної наукової проблеми: виробництво електроенергії з вторинної теплоти двигунів внутрішнього згорання з одночасним отриманням додаткового ресурсу - прісної води, яка має високу

ціну в Іраку. Тобто для Іраку питання утилізації вторинної теплоти дизельних електростанцій з додатковим отриманням технічної води є особливо актуальним.

Аналіз дизельних електростанцій Іраку показав, що перспективним є дизель з наддувом Hyundai H25/33. Проте, в дизель-генераторах Hyundai H25/33 відсутні системи утилізації тепла відпрацьованих газів та охолоджувальної рідини. Модернізація дизельних електростанцій Іраку відносно утилізації вторинної теплоти двигуна вимагає аналізу існуючих напрямків з урахуванням природних умов Іраку.

Дослідженнями різних аспектів цього питання займалися відомі вчені Шеховцов А.Ф., Марченко А.П., Шокотова М.К., Тимошевський Б.Г., Ткач М.Р., Радченко А.Н., Яседепа С. Кондла, Кірінціоне Н. І. та інші.

Дослідження зазначених вчених показують, що з урахуванням кліматичних умов Іраку доцільно зосередитися на наступних напрямках утилізації тепла. А саме: отримання додаткової електроенергії та конденсату води з відпрацьованих газів ДВЗ.

Прийняття раціональних рішень по утилізації вторинної теплоти двигунів для умов Іраку засновуватиметься на основі термодинамічної оцінки цих технічних рішень. Методика термодинамічної оцінки технічних рішень з утилізації теплоти відпрацьованих газів розроблена провідними вченими Марченко А.П., Шокотов М. К. та інші. Зазначена методика успішно апробована дослідниками у галузі розробки технічних рішень по утилізації теплоти ДВЗ. Результати попередніх розрахунків ексергетичного ККД утилізаційного контуру дизельної електростанції на базі двигуна Hyundai H25/33 по зазначеній методиці наведені на рис. 2.

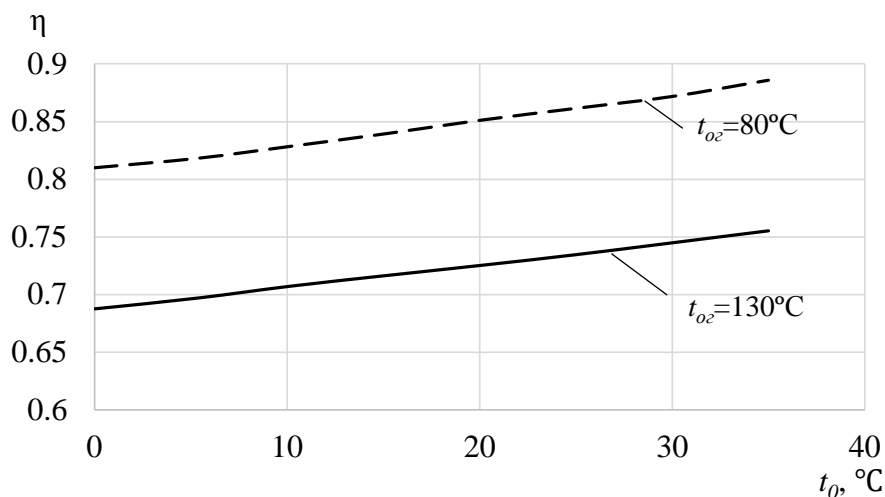


Рисунок 2 – Зміна ексергетичного ККД утилізаційного парогенератора при зміні температури навколишнього середовища  $t_0$  для температури відпрацьованих газів після парогенератора:  $t_{oz} = 130^\circ\text{C}$ ;  $t_{oz} = 80^\circ\text{C}$

Попередня термодинамічна оцінка дає ексергетичний ККД утилізаційного парогенератора від 69 до 75% (рис. 2) при середній температурі відпрацьованих газів  $420^\circ\text{C}$ , температурі «точки роси» –  $130^\circ\text{C}$  і зміні температури навколишнього середовища від  $0$  до  $35^\circ\text{C}$ . Глибоке охолодження відпрацьованих

газів до температури 80 °С веде до збільшення ексергетичного ККД утилізаційного парогенератора до величини, що змінюється в межах 81 – 88%.

Таким чином, висока глибина утилізації вторинної теплоти в ДВЗ може бути досягнута при утилізації тепла охолоджуючої води і відпрацьованих газів, що вимагає виконання комплексу теоретичних і експериментальних досліджень.

У **другому розділі** розглянута енергетична установка на базі дизеля Hyundai H25/33, розроблена технологічна схема та конструктивні елементи системи утилізації теплоти відпрацьованих газів та системи охолодження двигуна, розглянута методика розрахунку параметрів утилізаційної установки.

Виходячи з даних технічних характеристик двигуна Hyundai H25/33 особливу увагу приділялось дослідженням наступних параметрів:

- температури охолоджуючої води на вході і виході з охолоджувача наддувного повітря та охолоджувача системи охолодження двигуна;

- температури відпрацьованих газів на виході з турбокомпресора двигуна Hyundai H25/33;

- тиску охолоджувальної води в основному обладнанні системи охолодження двигуна.

Встановлено, що ефективність системи утилізації теплотив двигуні внутрішнього згорання залежить від організації системи охолодження наддувного повітря і організації системи охолодження циліндрів самого двигуна. Розподіл теплоти двигуна Hyundai H25/33 показаний на рис. 3.

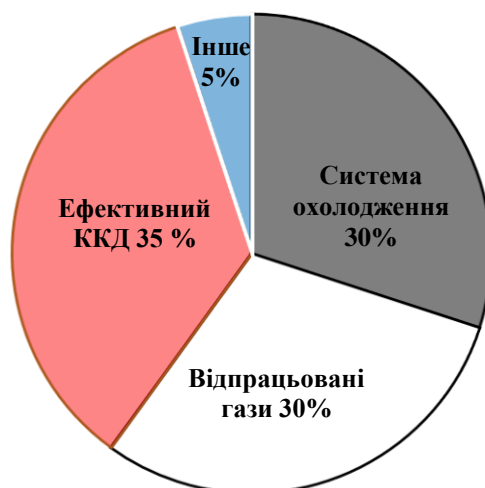


Рисунок 3 – Розподіл теплоти в двигуні Hyundai H25/33

В системі охолодження та з відпрацьованими газами двигуна Hyundai H25/33 втрачається близько 60% енергії згорання палива. Для утилізації вторинної теплоти двигуна Hyundai H25/33 проаналізовані схемні рішення, технології та методи, які можуть бути використані в утилізаційному контурі когенераційної установки.

При використанні води в якості робочого тіла в утилізаційному контурі установки TES (Thermo Efficiency System) відпрацьовані гази направляються до турбіни турбокомпресора, а потім – в утилізаційний котел, де виробляється пар для силової парової турбіни електрогенеруючої установки. У цьому випадку



використовуються закритий цикл Ренкіна, в якості робочого тіла використовується вода. При такому підході ефективність утилізації тепла складе 4-7%.

Аналіз використання органічного циклу Ренкіна дозволяє спрогнозувати підвищення ефективності утилізаційного контуру двигуна внутрішнього згорання до 13-14 %. Проте, для реалізації органічного циклу Ренкіна необхідне застосування двоконтурної системи утилізації теплоти відпрацьованих газів і охолоджуючої рідини ДВЗ. Крім того, необхідно встановити більш високий тиск робочого тіла у двоконтурній схемі, ніж в циклі Ренкіна, який працює на воді.

При застосуванні охолоджуючої рідини системи охолодження ДВЗ в утилізаційних парогенераторах сформовані вимоги щодо складу розчинених у ній солей, кисню і хлору (табл. 1).

Таблиця 1 – Вимоги до охолоджуючої води ДВЗ, яка використовується в якості води в утилізаційних парогенераторах

Параметр			
Жорсткість	Вміст хлоридів	pH	Вміст кисню
не більше 0,070 мг/дм <sup>3</sup>	- не більше 0,3 мг / кг <sup>3</sup>	не менш 8,5	не більше 0,15 мг / кг <sup>3</sup>

При застосуванні в утилізаційних парогенераторах охолоджуючої води системи охолодження ДВЗ з вмістом речовин згідно табл.1 забезпечуються вимоги до надійної і безаварійної роботи. У зв'язку з цим, в системі рекуперації теплоти відпрацьованих газів та системи охолодження можливо застосувати технологічну схему відкритого циклу Ренкіна з конденсацією парів води з відпрацьованих газів на поверхнях економайзера. Застосування відкритого циклу Ренкіна є перспективним для реалізації в двигунах Hyundai H25/33 оскільки здійснюється більш глибока утилізація теплот відпрацьованих газів та системи охолодження двигуна, що підвищує ефективність самого циклу.

Метод кінцевих елементів дозволяє представити систему утилізації вторинної теплоти двигуна Hyundai H25/33 у вигляді відокремлених об'єктів, пов'язаних між собою одним робочим тілом - конденсатом водяної пари у вигляді пари і рідкої фази. Відповідно до технологічної схеми утилізації вторинної теплоти двигуна прийнято розімкнутий цикл Ренкіна який в *i-s* координатах має вигляд (рис. 4).

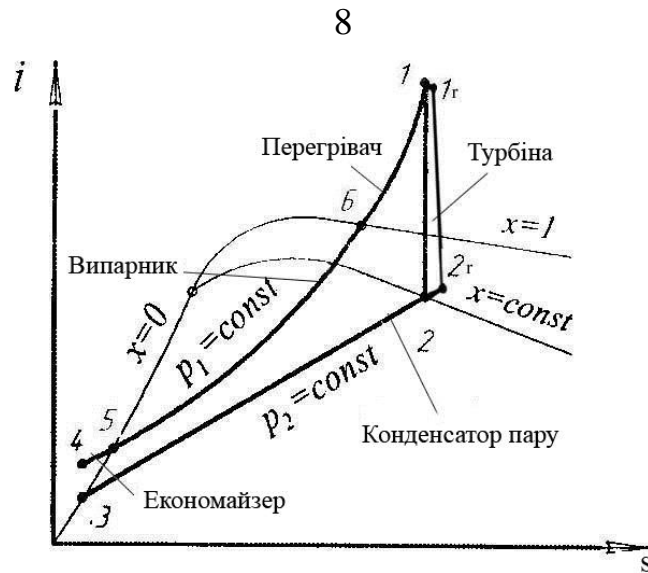


Рисунок 4 – Розімкнутий цикл Ренкіна в  $i-s$  координатах

З урахуванням проаналізованих особливостей схем та методів утилізації теплоти відпрацьованих газів ДВЗ розроблена технологічна схема (рис. 5).

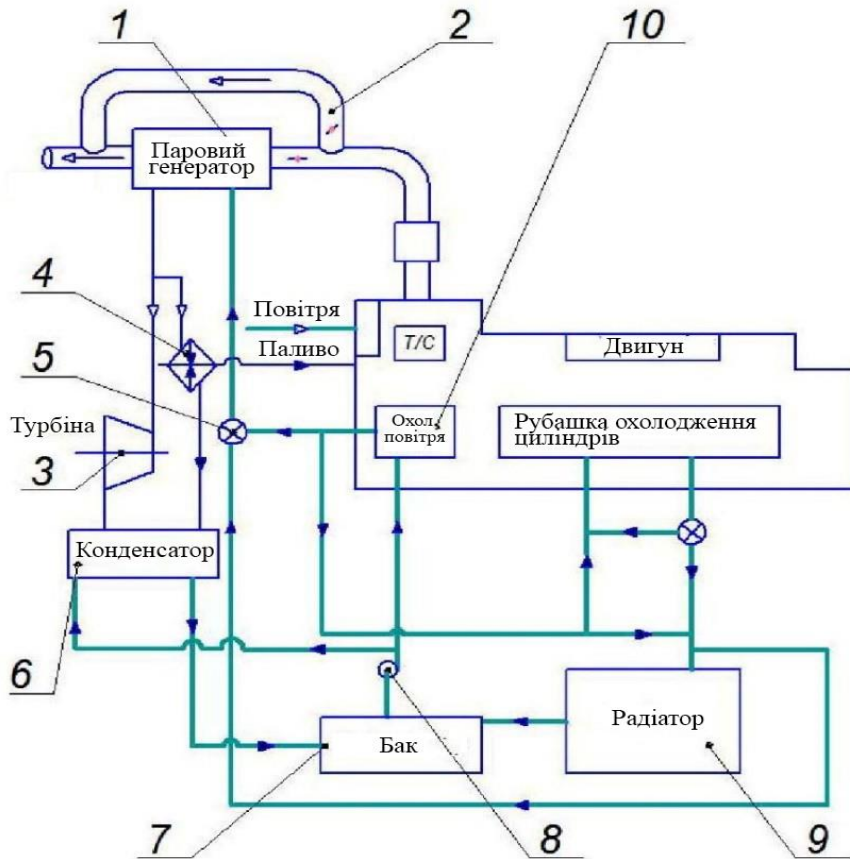


Рисунок 5 – Технологічна схема утилізації вторинної теплотивідпрацьованих газів і системи охолодження двигуна Hyundai H25/33: 1 - утилізаційний парогенератор; 2 - байпасний газопровід; 3 - парова турбіна; 4 - паровий підігрівач палива; 5 - терморегулятор; 6 - конденсатор змішаного типу; 7 - бак-розширювач системи охолодження двигуна; 8 - насос; 9 - радіатор охолодження води; 10 - охолоджувач повітря після турбокомпресора

Відповідно до технологічної схеми утилізації вторинної теплоти двигуна Hyundai H25/33 (теплота відпрацьованих газів та частково теплота системи охолодження двигуна) згенерована в утилізаційному парогенераторі водяна пара витрачається на підігрів палива і виробництво додаткової електроенергії.

Система утилізації вторинної теплоти двигуна Hyundai H25/33 (рис. 5) являє складну сукупність апаратів з певними технічними характеристиками, що залежать від параметрів навколишнього середовища і теплотехнічних особливостей процесів, що в них протікають. При математичному моделюванні процесів теплообміну системи утилізації вторинної теплоти двигуна, всі вузли розглядаються як кінцеві елементи, пов'язані між собою потоками робочих тіл.

В основу методики математичного моделювання утилізаційного парогенератора лежить математична залежність ентальпії відпрацьованих газів ДВЗ в залежності від температури відпрацьованих газів  $t_2$  та коефіцієнту надлишку повітря  $\alpha$  у вигляді функції  $I_2 = f(t_2, \alpha)$ . Така функція дозволяє визначити значення температури відпрацьованих газів  $t_2$  в будь-якій точці газового тракту утилізаційного парогенератора на підставі теплового балансу та значення ентальпії відпрацьованих газів  $I_2$ .

Припускаючи, що в утилізаційному парогенераторі відсутні додаткові джерела теплоти (відсутній променистий теплообмін в циліндрі двигуна) і він герметичний, систему диференціальних рівнянь для відпрацьованих газів і робочого тіла можна представити у вигляді:

$$-\varphi \cdot G_2 \cdot dI_2 = k_j \cdot (t_2 - t_j) \cdot \frac{F_j}{x} \cdot dx - G_p; \quad -G_p \cdot di = k_j \cdot (t_2 - t_j) \cdot \frac{F_j}{x} \cdot dx, \quad (1)$$

де  $G_2$  – розрахункова витрата відпрацьованих газів, кг/с;  $G_p$  – витрата робочого тіла (пар, вода), кг/с;  $\varphi$  – коефіцієнт збереження теплоти;  $I_2$  – ентальпія відпрацьованих газів, кДж/кг;  $i$  – ентальпія робочого тіла (пар, вода), кДж/кг;  $k_j$  – поточне значення коефіцієнта теплопередачі, Вт·м<sup>-2</sup>·К<sup>-1</sup>;  $(t_2 - t_j)$  – поточне значення різниці температур відпрацьованих газів і робочого тіла, °С;  $F_j/x$  – відношення поверхні до довжини апарату, м;  $x$  – поточне значення довжини теплообмінника по ходу руху відпрацьованих газів, м.

Чисельне рішення рівняння (1) можливо на підставі отримання регресійних рівнянь залежностей технічних характеристик обладнання утилізаційного контуру від параметрів процесу експлуатації. На підставі математичної обробки літературних даних отримані регресійні рівняння, що використовуються в математичних моделях вузлів системи.

Для оцінки ефективності циклу Ранкіна використаний ентропійний метод з використанням відомої теореми Гюї-Стодоли. Цей метод дозволяє, крім оцінки ефективності всієї установки, визначити відносну величину необоротних втрат в кожному з елементів установки.

Для розімкнутого циклу Ренкіна (рис. 4) незворотні втрати можна розглядати в наступних елементах: утилізаційний парогенератор (зміна параметрів робочого тіла від точки 4 до точки 1); паропровід (зміна параметрів робочого тіла від точки 1 до

точки 1r); парова турбіна (зміна параметрів робочого тіла від точки 1г до точки 2г); конденсатор (зміна параметрів робочого тіла від точки 2г до точки 3).

В свою чергу втрати, викликані зовнішньою необоротністю можна розглядати при теплообміні між газами двигуна внутрішнього згорання і робочим тілом в утилізаційному парогенераторі (тобто в процесі пароутворення) через велику різницю температур між ними та при теплообміні гарячих газів і робочого тіла (водяна пара) з навколишнім середовищем через недосконалість теплової ізоляції в обладнанні циклу Ренкіна і вздовж усього тракту установки.

Абсолютний ефективний ККД розімкнутого циклу Ренкіна на основі розрахованої величини втрати працездатності

$$\eta_{rc} = \left(1 - \frac{T_g}{T_{c1}}\right) - \frac{\Delta L_{rc}}{(I_{c1} - I_g)},$$

де  $T_g$  – температура повітря навколишнього середовища, К;  $T_{c1}$  – температура відпрацьованих газів на вході в утилізаційний парогенератор, К;  $\Delta L_{rc}$  – втрати теплоти в утилізаційному контурі, кДж/кг;  $I_{c1}$  – ентальпія відпрацьованих газів на вході в утилізаційний парогенератор, кДж/кг;  $I_g$  – ентальпія повітря навколишнього середовища, кДж/кг.

Таким чином, враховуючи особливості енергетичної установки з дизелем Hyundai H25/33 була розроблена технологічна схема утилізації теплоти відпрацьованих газів та системи охолодження двигуна, розглянута методика математичного моделювання теплофізичних процесів в утилізаційному контурі системи.

**Третій розділ** присвячено математичному моделюванню та дослідженню параметрів робочого тіла елементів утилізаційної установки з двигуном Hyundai H25/33, визначено діапазон експлуатаційних характеристик устаткування утилізації вторинної теплоти за циклом Ренкіна в залежності від параметрів навколишнього середовища.

Обробкою експериментальних даних двигуна Hyundai H25/33 отримано регресійна залежність ентальпії відпрацьованих газів двигуна від коефіцієнту надлишку повітря  $\alpha$  та температури відпрацьованих газів  $t_2$ , яка потрібна для подальшого дослідження параметрів утилізаційного контуру

$$I_2 = 424,58 - 180,24 \cdot \alpha + 1,27 \cdot t_2 + 15,48 \cdot \alpha \cdot t_2 + 0,0045 \cdot t_2^2, \text{ кДж/кг}$$

Основною концепцією моделювання парогенератора теплового відновлення є концепція кінцевих елементів. Згідно з цією концепцією, парогенератор рекуперації теплоти може бути представлений трьома основними елементами, з'єднаними єдиним робочим тілом (відпрацьованими газами): перегрівником, випарником та економайзером. Це дозволяє виконувати окреме моделювання процесів теплопередачі для кожного кінцевого елемента та узгодити рівняння енергетичного балансу для відпрацьованих газів.

Кількість тепла, що поглинається парогенератором теплового відновлення визначається наступним чином

$$G_p = \frac{(1 - \delta_5(Gp)) \cdot [Gt \cdot (I_{e1} - I_{e2})]}{i_{w0} - i_{w1} + r + h_1 - h_0},$$

де  $Gt \cdot (I_{e1} - I_{e2})$  – кількість тепла, що передається відпрацьованими газами, кДж/год;  $Gt$  – кількість палива, спожитого двигуном Hyundai H25/33, кг/год;  $I_{e1}, I_{e2}$  – ентальпія відпрацьованих газів на вході та виході парогенератора, кДж/кг;  $i_{w0}, i_{w1}$  – ентальпія води на вході та виході економайзера, кДж/кг;  $r$  – випарювана теплота води, кДж/кг;  $h_0, h_1$  – ентальпія пару на вході і виході з пароперегрівача, кДж/год;  $G_p$  – кількість пари, що утворюється в парогенераторі, кг/год.

Результати математичного моделювання генерації пари в утилізаційному парогенераторі за умови наближення температури перегрітого пару до температури відпрацьованих газів представлені на рис. 6.

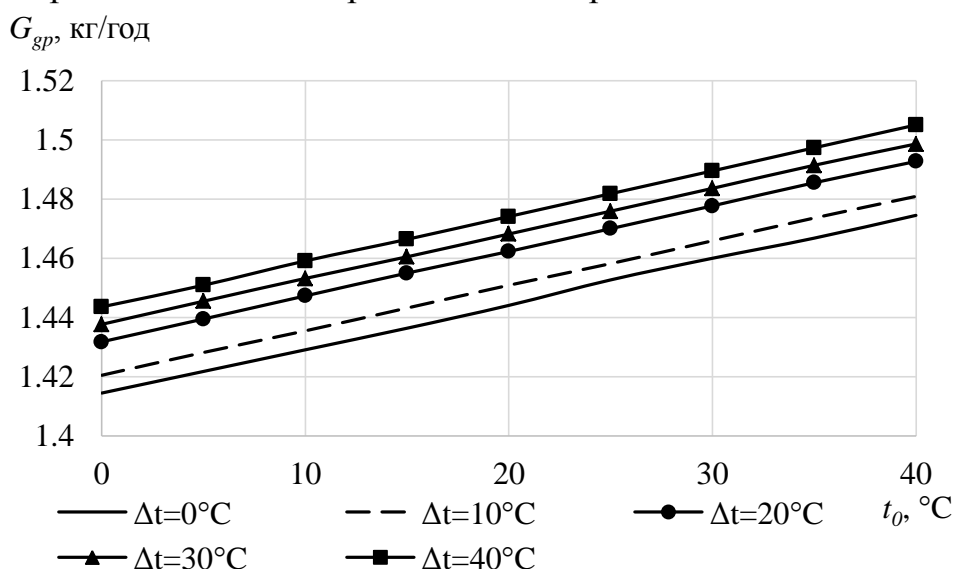


Рисунок 6 – Кількість згенерованої водяної пари ( $G_{gp}$ ) в залежності від ступеня наближення температури перегрітої пари до температури відпрацьованих газів ( $\Delta t$ ) і температури навколишнього середовища  $t_0$

Згідно з даними, наведеними на рис. 6, коли температура перегрітої пари наближається до температури відпрацьованих газів, а також коли зменшується температура навколишнього середовища кількість утвореного пару поступово зменшується.

Додаткові елементи для підігріву і очищення паливадвигуна Hyundai H25/33 викликають необхідність у визначенні оптимальних параметрів розробленої двостадійної системи підігріву палива, що використовує вторинну теплоту двигуна.

Оскільки теплообмінник характеризується лінійною моделлю розподілу температури по його довжині, то кінетичні та балансові співвідношення протиточного теплообміну мають вигляд:

$$\frac{\partial Q_1}{\partial \tau} = \alpha_1 \cdot F_1 \cdot \left( \frac{T_{t2} - T_{t1}}{2} - T_{st} \right); \quad \frac{\partial Q_2}{\partial \tau} = \alpha_2 \cdot F_2 \cdot \left( \frac{T_{w1} - T_{w2}}{2} - T_{st} \right);$$

$$\frac{\partial Q_1}{\partial \tau} = \frac{Gt}{\rho t (T_{t2} - T_{t1})}, \quad \frac{\partial Q_2}{\partial \tau} = \frac{Gw}{\rho w (T_{w1} - T_{w2})}. \quad (2)$$

де  $\alpha_1, \alpha_2$  – коефіцієнти тепловіддачі робочих тіл у апараті, Вт/(м<sup>2</sup> К);  $T_{t1}, T_{t2}$  – температура палива на вході та виході з апарату, К;  $T_{w1}, T_{w2}$  – температура нагріваючого тіла на вході та виході з апарату, К;  $T_{st}$  – температура стінки, К;  $\rho_t, \rho_w$  – густина палива та нагріваючого, кг/м<sup>3</sup>;  $G_t, G_w$  втрати палива та нагріваючого тіла, м<sup>3</sup>/с.

Диференціальні рівняння (2) визначають зміну температури теплоносія на поверхні теплопередачі. Враховуючи граничні умови, що визначають вхідні температури охолоджуючих рідин, рівняння (2) складають математичну модель паливного нагрівача.

Чисельне рішення системи рівнянь (2) дає наступну залежність витрати водяної пари для нагріву палива до необхідної температури двигуна Hyundai H25/33 (рис.7).

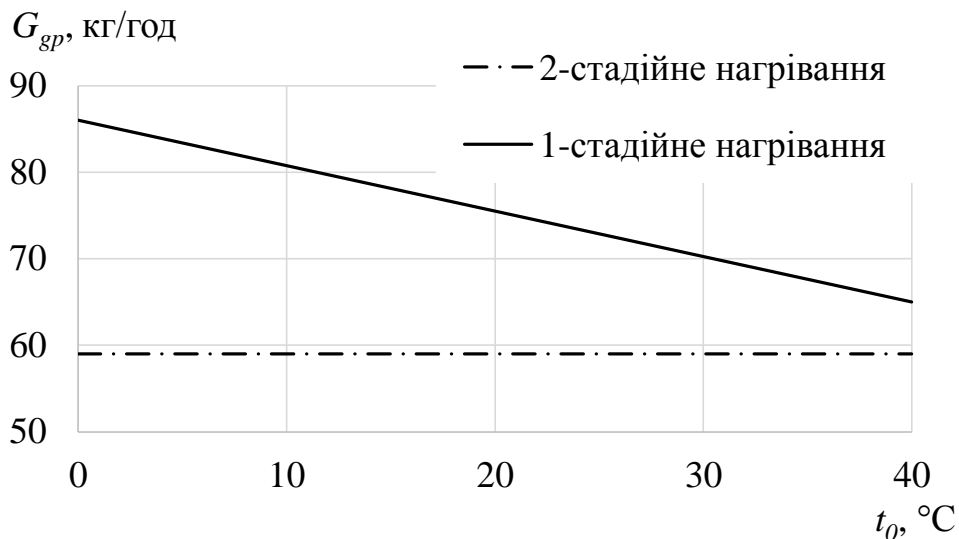


Рисунок 7 – Витрата водяного пару на нагрівання палива придухстадійному і одностадійному нагріванні

Аналіз даних рис. 7 показав, що для двоступеневого нагрівання палива (первинне нагрівання з гарячою водою з охолоджувачем системи повітропостачання), кількість пари нагріву  $G_{gp}$  не залежить від температури навколишнього середовища і становить близько 60 кг/год. Це пов'язано з тим, що нагрівач палива нагрівається до фіксованої температури 60 ° С у водяному нагрівачі. У той же час, для одноступеневого нагрівача палива, кількість пари нагріву  $G_{gp}$  залежить від температури навколишнього середовища. Крім того, використання одноступеневого паливного нагрівача, що працює на водяній парі, який генерується в парогенераторі, економічно недоцільно, оскільки кількість пари, що потрапляє в парову турбіну для отримання додаткової енергії в двигуні Hyundai H25/33, буде значно зменшено.

З метою визначення мінімально допустимої температури конденсації водяної пари, при якій можлива робота парової турбіни та можливо додатково визначити досягнуті значення потужності електроенергії додаткового генератора електроенергії проведено математичний аналіз змішувального конденсатора. Дані аналізу показують, що для кліматичних умов Іраку і технічних характеристик двигуна Hyundai H25/33:

- оптимальне значення співвідношення кількості утвореної пари в парогенераторі  $G_p$  до витрати охолоджуючої рідини  $W$  становить  $m_{op} = G_p / W = 11$ ;
- максимальний нагрів охолоджуючої води становить  $5,3 \text{ }^\circ\text{C}$ .

При цьому остаточна температура охолоджуючої води після охолоджувача повітря буде підвищена не більш, ніж на  $1^\circ\text{C}$ , щоне впливає на технічні характеристики дослідного двигуна.

Враховуючі припущення, що внутрішній відносний ККД турбіни Лавалля приймається в першому наближенні  $\eta_{int} = 0,5$  і сумарний ККД редуктора та генератора електроенергії  $\eta_g = 0,95$ , можна визначити приблизне значення потужності генератора електричної енергії в залежності від температури навколишнього середовища (рис. 8).

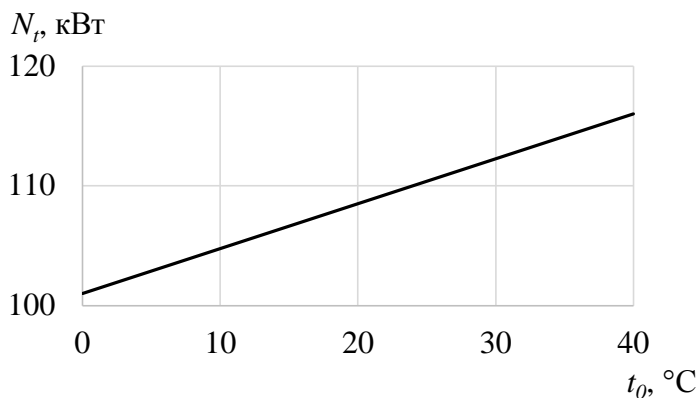


Рисунок 8 – Орієнтовна потужність генератора електричної енергії в Циклі Ренкіна ( $N_t$ ) в залежності від температури навколишнього середовища ( $t_0$ )

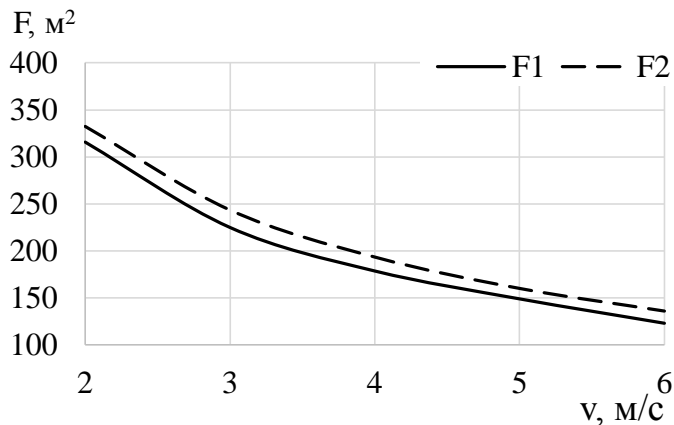


Рисунок 9 - Залежність необхідної площі поверхні пластинчастого рекуперативного теплообмінника від швидкості потоку робочого тіла в каналах теплообмінника:

$F_1, F_2$  – необхідна площа поверхні теплообміну при температурі навколишнього середовища  $t_0 = 0^\circ\text{C}$  та  $t_0 = 40^\circ\text{C}$

діапазоні зміни температури навколишнього середовища від  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $40$

З рис. 8 видно, що при зміні температури навколишнього середовища від  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  кількість електроенергії, виробленої за циклом Ренкіна для двигуна Hyundai H25/33 збільшується до  $10\%$ . Мала потужність парової турбіни дає можливість спроектувати її як одноступеневу турбіну.

В якості конденсатора водяної пари в роботі пропонується використання теплообмінника пластинчастого типу. Розрахунок теплообмінника здійснюється за залежністю

$$\frac{G_c}{G_b} = \frac{l_c n_c w_c \delta_c}{l_b n_b w_b \delta_b},$$

де  $G_c, G_b$  – швидкість потоку суміші та повітря, кг/с;  $l_c, l_b$  – довжина поперечного перерізу каналів для суміші та повітря, м;  $n_c, n_b$  – кількість секцій теплообмінника суміші та повітря;  $w_c, w_b$  – середні швидкості суміші та повітря в поперечному перерізі каналів, м/с;  $\delta_c, \delta_b$  – ширина поперечного перерізу каналу для проходження суміші та повітря, м.

Виконаний розрахунок пластинчастого рекуператора теплоти з відпрацьованих газів в

°C. Результати розрахунків представлені у вигляді залежності теплообмінної поверхні пластинчастого рекуператора теплоти, необхідної для конденсації 0,005-0,006 кг технічної води з одного кілограма відпрацьованих газів від швидкості руху робочих середовищ в каналах теплообмінника (рис.9).

Аналіз даних, представлених на рис. 9, показує, що для заданих температурних градієнтів між робочими рідинами в теплообміннику пластинчастого типу температура навколишнього повітря не впливає на необхідну площу поверхні теплообміну.

**Четвертий розділ** присвячено розробці технологічної схеми модернізації існуючих в Іраку дизельних електростанцій DPP компанії Hyundai Heavy Industries на основі дизеля Hyundai H25/33; розробці вимог до обладнання системи рекуперації теплоти відпрацьованих газів та системи охолодження двигуна Hyundai H25/33; техніко-економічному обґрунтуванні рекомендованих технічних рішень.

На підставі чисельної реалізації математичних моделей обладнання системи рекуперації тепла в двигуна Hyundai H25/33 на основі відкритого циклу Ренкіна було розроблено два варіанта технологічної схеми модернізації дизельних електростанцій компанії Hyundai Heavy Industries (рис. 10). Особливістю технологічних схем є необхідність розробки спеціальної конфігурації утилізаційних парогенераторів. Це обумовлено розміщенням дизеля Hyundai H25/33 і допоміжного обладнання, котре не дозволяє застосовувати утилізаційні парогенератори відомих фірм Aalborg Industries Group's та RAUMA-REPOLA OY. Крім того, виконання вимоги надійності системи рекуперації тепла зумовило необхідність використання в технологічній схемі одного з існуючих допоміжних котлів в режимі –«гарячий резерв».

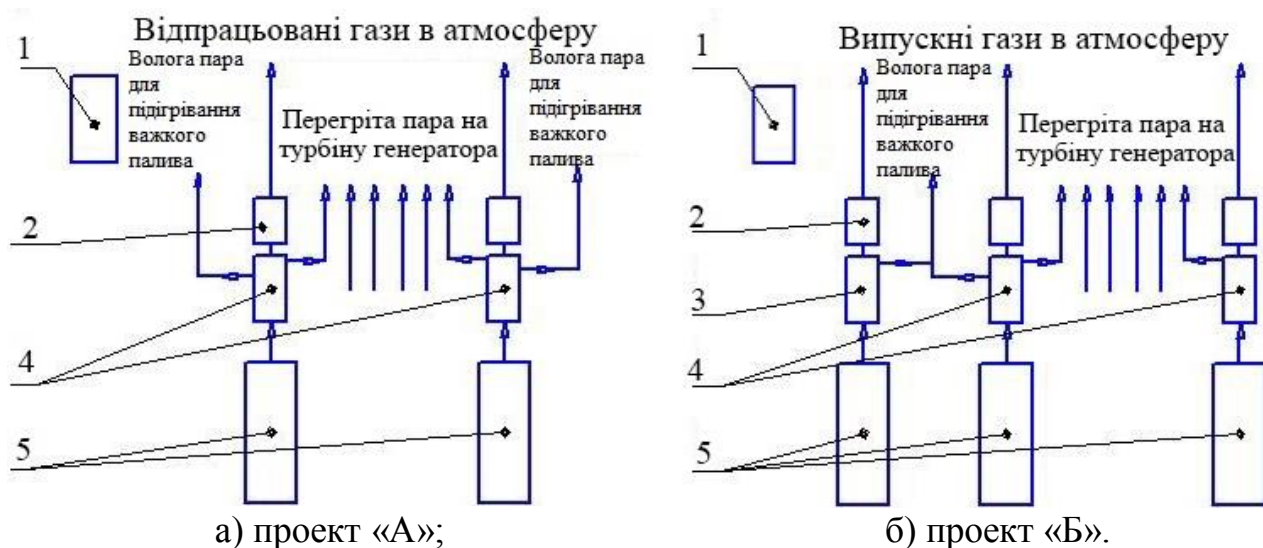


Рисунок 11 – Принципові технологічні схеми роботи устаткування системи утилізації вторинної теплотидизеля Hyundai H25/33: 1 – допоміжний котел (OFB); 2 – конденсатор водяної пари з відпрацьованих газів (CWS); 3, 4 – утилізаційні парогенератори (RSSG); 5 – дизель Hyundai H25/33



Відмінність проекту «А» від проекту «Б» полягає в тому, що в проекті «А» пар на підігрів палива відбирається від всіх утилізаційних парогенераторів, в проекті «Б» – пар на підігрів палива відбирається тільки від одного утилізаційного парогенератора.

Рекомендовано проект «А» використовувати з метою отримання більшої економії нафтового палива для ДВЗ, проект «Б» – отримання більшої частки електроенергії. Крім того, тиск перегрітої пари перед розширювальною машиною повинен бути 0,6-0,8 МПа. У випадку застосування утилізаційної системи з отриманням конденсату водяної пари з ВГ температура останніх на виході з парогенератора повинна бути близько 80 °С, в іншому випадку – 150°С. Мінімальний перепад температур між ВГ перед парогенератором та перегрітою парою перед турбіною повинен бути не менше 20 °С.

Для техніко-економічної оцінки проектів «А» та «Б» використовувався один з методів оцінки ефективності інвестиційних проектів – метод NPV (Net Present Value). Для того, щоб знайти NPV інвестиційного проекту необхідно знайти чисту приведену вартість всіх грошових потоків, пов'язаних з проектом. Такий підхід до оцінки інвестиційної привабливості проектів «А» та «Б» надає можливість у графічному вигляді уявити порядок залучення інвестиційних коштів і терміни їх погашення (рис. 11).

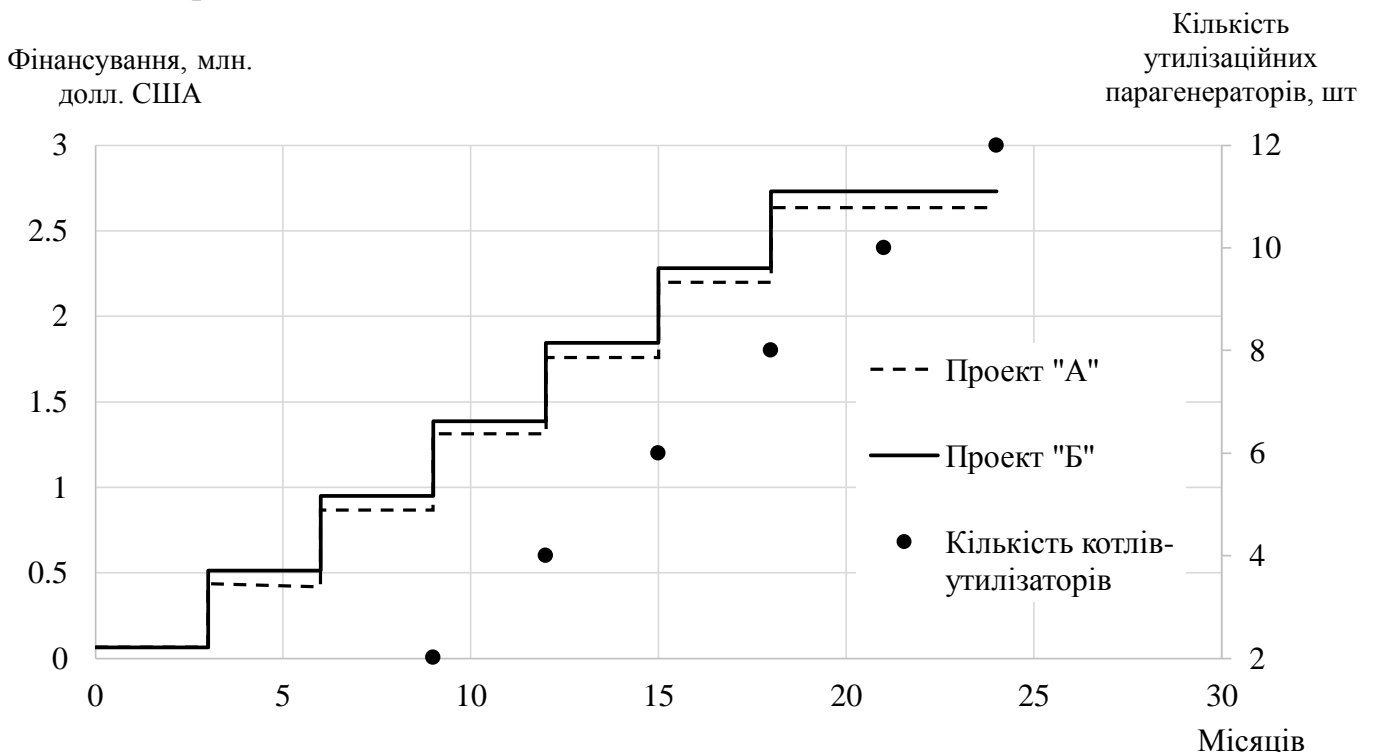


Рисунок 11 – Фінансування проектів «А» та «Б»

Після того, як обладнання утилізаційного контуру в повному обсязі буде введено у експлуатацію, максимально досяжний прибуток складе близько 1 406 219 дол. США/рік. Ця сума річного прибутку від модернізації електростанції з двигунами Hyundai H25/33 забезпечує інвестиційну привабливість

розробленої технології рекуперації теплоти відпрацьованих газів та частково теплоти системи охолодження двигуна.

У додатках наведено результати розрахункових досліджень утилізаційної установки вторинної теплоти ДВЗ та акти впровадження.

## **ВИСНОВКИ**

У дисертаційному дослідженні поставлена та вирішена науково-практична задача вибору і обґрунтування параметрів дизель-електричної станції з системою утилізації вторинної теплоти дизеля з використанням циклу Ренкіна.

1. За результатами аналізу технологічних схем систем рекуперації вторинної теплоти в двигунах внутрішнього згоряння та особливостей перспективної енергетичної установки з двигуном Hyundai 25/33 для виробництва електричної енергії на заводі в Іраку запропонована технологічна схема системи утилізації теплоти відпрацьованих газів та системи охолодження двигуна, з додатковим отриманням електроенергії, теплоти для підігріву важкого палива, конденсації технічної води з відпрацьованих газів двигуна.

2. Розроблено утилізаційний контур установки, який працює за органічним циклом Ренкіна з застосування двоконтурної системи утилізації теплоти відпрацьованих газів і охолоджуючої рідини в ДВЗ, що дозволяє підвищити ефективність утилізаційного контуру двигуна внутрішнього згоряння до 13-14 %.

3. Розроблена математична модель системи рекуперації вторинної теплоти двигуна Hyundai 25/33, що працює за циклом Ренкіна в якому використовується теплота відпрацьованих газів та системи охолодження. Математична модель дозволяє оцінити вплив різних параметрів на ефективність окремих елементів утилізаційного контуру і об'єкта дослідження в цілому.

4. В результаті розрахунково-експериментальних досліджень утилізаційного парогенератора визначено:

- при використанні води системи охолодження двигуна в утилізаційному парогенераторі за рахунок теплоти відпрацьованих газів в залежності від температури навколишнього середовища можна отримати водяної пари з температурою від 365 до 390 °С. При цьому, термодинамічний ККД утилізаційного парогенератора становить близько 80%;

- для забезпечення необхідної температури палива перед подачею його в циліндр двигуна, в залежності від температури навколишнього середовища, необхідно витратити від 65 до 85 кг/год пару, що генерується в утилізаційному парогенераторі;

- доведено можливість використання в якості охолоджуючої рідини води після охолоджувача з температурою від 46 до 58 °С, при цьому остаточна температура охолоджуючої води після охолоджувача повітря буде підвищена не більш, ніж на 1 °С, що не впливає на технічні характеристики дизеля Hyundai H25/33;

- при роботі турбіни Лаваля в циклі Ранкіна максимальне значення ККД парової турбіни-редуктора-генератора перевищує значення 0,5, при цьому потужність генератора електричного струму, в модернізованому циклі Ранкіна,

при температурі навколишнього середовища  $t_0 = 0^\circ\text{C}$  не перевищує значення 110 кВт, а при  $t_0 = 40^\circ\text{C}$  - 116 кВт;

- при зміні температури навколишнього середовища від  $0^\circ\text{C}$  до  $40^\circ\text{C}$  кількість електроенергії, виробленої за циклом Ренкіна для двигуна Hyundai H25/33 збільшується до 10%. В якості конденсатора водяної пари доцільно використання теплообмінника пластинчастого типу. Зниження температури відпрацьованих газів на 10-12  $^\circ\text{C}$  забезпечує конденсацію парів води в кількості від 0,005-0,006 кг/кг відпрацьованих газів. Таким чином, при роботі однієї когенераційної установки з двигуном Hyundai H25/33 можна отримати на добу до 2300 кг конденсату водяної пари.

На основі виконаних досліджень було розроблено два варіанта технологічної схеми (проекти «А» та «Б») модернізації дизельних електростанцій компанії Hyundai Heavy Industries. Рекомендовано проект «А» використовувати з метою отримання більшої економії нафтового палива для ДВЗ, проект «Б» – отримання більшої частки електроенергії. Крім того, тиск перегрітої пари перед розширювальною машиною повинен бути 0,6-0,8 МПа. У випадку застосування утилізаційної системи з отриманням конденсату водяної пари з ВГ температура останніх на виході з парогенератора повинна бути близько  $80^\circ\text{C}$ , в іншому випадку –  $150^\circ\text{C}$ . Мінімальний перепад температур між ВГ перед парогенератором та перегрітою парою перед турбіною повинен бути не менше  $20^\circ\text{C}$ .

5. Виконана техніко-економічна оцінка проектів за метод NPV показала, щопісля того, як обладнання утилізаційного контуру в повному обсязі буде введено у експлуатацію, максимально досяжний прибуток складе близько 1 406 219 дол. США/рік.

6. Результати дисертаційної роботи рекомендовано до впровадження на дизельній енергетичній станції у Аль-Жадрия в Іраку, а також використовуються в навчальному процесі й наукових дослідженнях на кафедрі двигунів внутрішнього згорання НТУ «ХП».

### **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Хамза Али Адел Хамза. Waste heat recovery systems for internal combustion engines: classification and benefits / А.П. Марченко, Д.Е. Самойленко, Хамза Али Адел, Хамза Омар Адел Хамза // Двигатели внутреннего сгорания. – 2014. – № 2. – С.37-41.

*Здобувачем проаналізовані системи рекуперації теплоти відпрацьованих газів двигунів внутрішнього згорання, проведена оцінка переваг їх використання.*

2. Хамза Али Адел Хамза. Ways of using waste energy from i.c. engines exhaust gases / А. П. Марченко, Д.Е. Самойленко, Хамза Али Адел Хамза // Двигатели внутреннего сгорания. – 2015. – №2. – С.22-26.

*Здобувачем розглянуті основні способи утилізації відпрацьованих газів для виробництва електричної енергії.*

3. Хамза Али Адел Хамза. Методология оценки эффективности системы рекуперации тепла выхлопных газов для дизельных электростанций / А.П. Марченко, Хамза Али Адел, Хамза Омар Адел Хамза // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2016. – № 2. – С. 124-126.

*Здобувач запропонував методика оцінки ефективності систем утилізації вторинної теплоти двигунів дизельних станцій.*

4. Хамза Али Адел Хамза. Оценка инвестиционной привлекательности энергосберегающих технологий на основе тепловых двигателей применительно к нефтеперерабатывающему заводу / А.П. Марченко, Хамза Али Адел, Хамза Омар Адел Хамза // Двигатели внутреннего сгорания. – 2016. – №1. – С.67-71.

*Здобувач представив економічну оцінку запропонованих схем електростанцій на базі двигунів внутрішнього згорання та газотурбінного двигуна.*

5.Хамза Али Адел Хамза. Использование выхлопных газов дизельной силовой установки для получения дополнительных источников питания с использованием цикла Ренкина / А.П. Марченко, Хамза Али Адел, Хамза Омар Адел Хамза // European Journal of Technical and Natural Sciences. – Austria, Vienna. – 2016. – № 1-2. – Р. 11-17.

*Здобувачем запропоновано використання відпрацьованих газів дизельної електростанції з метою їх утилізації з використанням циклу Ренкіна.*

6. Хамза Али Адел Хамза. Parameter optimization of heat recovery steam generation for Hyundai engine H25/33 / А.П. Марченко, Хамза Али Адел, Хамза Омар Адел Хамза // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. – Austria, Vienna. – 2016. – № 3-4. – Р. 28-31.

*Здобувачем запропоновані оптимальні параметри згенерованого пару при використанні теплоти відпрацьованих газів та частково системи охолодження двигуна.*

7. Пат. 4017 Республіка Ірак. МПК F03B13/02, F03B17/00. Власне виробництво електроенергії з нафтопереробних заводів / Хамза Али Адел, Хамза Омар Адел Хамза. – заявл. 23.12.2012; опубл. 21.09.2014. *Здобувачем запропонована схема енергетичної установки по отриманню електричної енергії на нафтопереробному заводі.*

8.Пат. 116720 Україна, МПК F02D 29/06, F02B 63/04, F02D 25/00. Дизельна електростанція / Марченко А.П., Али Адел Хамза, Омар Адел Хамза; заявник та власник патенту Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». - № u201702936; заяв. 28.03.2017; опубл. 25.05.2017, бюл. № 10.

*Здобувач запропонував схему дизельної електростанції з системою утилізації вторинної теплоти двигуна.*

9.Хамза Али Адел Хамза. Системы утилизации энергии отработавших газов ДВС: классификация и преимущества / А.П. Марченко, Хамза Али Адел Хамза, Хамза Омар Адел Хамза, Д. Е. Самойленко // XIX Міжнар. конгрес двигунобудівників: Тези доповідей. – Харків: Нац. аерокосмічний ун-т «Харк. авіац. ін-т», 2014. – 104с. – С. 57.

*Здобувач проаналізував системи утилізації енергії відпрацьованих газів що використовуються в різних установках ДВЗ.*

10. Ali Adel Hamza. Using of open Rankine cycle for recovery of heat from exhaust gases in ICE/Ali Adel Hamza, Hussny Ali Mahmoud /Всеукраїнська науково-технічна конференція «Проблеми розвитку регіону: промисловий і економічний аспект», 2-3 червня 2016 р. : тези доп. – Первомайськ: ППІ НУК, 2016. – С.42-44.

*Здобувач обґрунтував доцільність використання циклу Ренкіна в системі утилізації вторинної теплоти ДВЗ.*

## АНОТАЦІЇ

**Хамза Алі Адел Хамза. Вибір та обґрунтування параметрів дизель-електричної станції з системою утилізації теплоти.** На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.03 – двигуни та енергетичні установки. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2017.

Дисертація присвячена вибору і обґрунтуванню параметрів дизель-електричної станції з системою утилізації вторинної теплоти дизеля з використанням циклу Ренкіна, що використовує теплоту відпрацьованих газів та системи охолодження.

В результаті аналізу особливостей перспективної енергетичної установки з двигуном Hyundai 25/33 для виробництва електричної енергії на заводі в Іраку розроблена технологічна схема комплексної системи утилізації вторинної теплоти дизель-електричної станції з додатковим отриманням електроенергії, теплоти для підігріву важкого палива, конденсації технічної води з відпрацьованих газів двигуна.

Для утилізації вторинної теплоти двигуна Hyundai H25/33 запропоновано утилізаційний контур установки, який працює за органічним циклом Ренкіна (ОЦР). В якості робочого тіла в циклі Ренкіна доцільно використовувати воду системи охолодження двигуна.

З використанням розробленої математичної моделі утилізаційного контуру дизель-електростанції виконане розрахунково-експериментальне дослідження впливу температури навколишнього середовища на показники ефективності утилізаційного контуру. При зміні температури навколишнього середовища від 0 °С до 40 °С кількість електроенергії, виробленої за циклом Ренкіна для двигуна Hyundai H25/33 збільшується до 10%.

При роботі однієї когенераційної установки з двигуном Hyundai H25/33 та розробленим утилізаційним комплексом можна отримати на добу до 2300 кг конденсату водяної пари, що є дуже цінною в Іраку.

На основі результатів дослідження було розроблено два варіанта технологічної схеми (проекти «А» та «Б») модернізації дизельних електростанцій компанії Hyundai Heavy Industries. Виконана техніко-економічна оцінка проектів за метод NPV показала, що після того, як обладнання утилізаційного контуру в повному обсязі буде введено у експлуатацію, максимально досяжний прибуток складе близько 1 406 219 дол. США/рік.

*Ключові слова:* двигун внутрішнього згорання, утилізація, теплота відпрацьованих газів, теплота системи охолодження, парогенератор, цикл Ренкіна.

**Хамза Али Адел Хамза. Выбор и обоснование параметров дизель-электрической станции с системой утилизации теплоты.** На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.05.03 - двигатели и энергетические установки. - Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2017.

Диссертация посвящена выбору и обоснованию параметров дизель-электрической станции с системой утилизации вторичного тепла дизеля с использованием цикла Ренкина, который использует теплоту отработавших газов и системы охлаждения.

В результате анализа особенностей перспективной энергетической установки с двигателем Hyundai 25/33 для производства электрической энергии на заводе в Ираку разработана технологическая схема комплексной системы утилизации вторичного тепла дизель-электрической станции с дополнительным получением электроэнергии, тепла для подогрева тяжелого топлива, конденсации технической воды с отработавших газов двигателя. В качестве рабочего тела в цикле Ренкина целесообразно использовать воду системы охлаждения двигателя.

С использованием разработанной математической модели утилизационного контура дизель-электростанции выполнено расчетно-экспериментальное исследования влияния температуры окружающей среды на показатели эффективности утилизационного контура. При изменении температуры окружающей среды от 0 °С до 40 °С количество электроэнергии, произведенной по циклу Ренкина для двигателя Hyundai H25 / 33 увеличивается до 10%.

При работе одной когенерационной установки с двигателем Hyundai H25/33 и разработанным утилизационным комплексом можно получить в сутки до 2300 кг конденсата водяного пара, что очень ценно в Ираке.

На основе результатов исследования было разработано два варианта технологической схемы (проекты «А» и «Б») модернизации дизельных электростанций компании Hyundai Heavy Industries. Выполнена технико-экономическая оценка проектов за метод NPV показала, что после того, как оборудование утилизационного контура в полном объеме будет введен в эксплуатацию, максимально достижимая прибыль составит около 1406219 долл. США / год.

*Ключевые слова:* двигатель внутреннего сгорания, утилизация, теплота отработанных газов, теплота системы охлаждения, парогенератор, цикл Ренкина.

**Hamza Ali Adel Hamza. Selection and substantiation the parameters of diesel power plant with heat recovery .Manuscript.**

Dissertation for the degree of candidate of technical sciences in specialty 05.05.03 - engines and power plants. - National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, 2017.

The dissertation is devoted to the choice and substantiation of parameters of a diesel power plant with heat recovery system of recycling the secondary heat from diesel engine using the Rankin cycle, which uses the heat of exhaust gases and cooling water systems.

As a result of the analysis of the features of a promising power plant with a Hyundai 25/33 engine for the production of electric power at a plant in Iraq, a technological scheme of a comprehensive system for recycling diesel fuel from an electric power station with the additional generation of electricity, heat for heating heavy fuel,

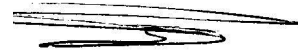
condensing technical water from exhaust gases. As a working fluid in the Rankin cycle, it is advisable to use the hot water from the engine cooling system.

Using the developed mathematical model of the distillation circuit of the diesel power plant, the design-experimental study of the influence of the ambient temperature on the indicators of the efficiency of heat recovery was performed. When the ambient temperature changes from 0 ° C to 40 ° C, the amount of electric energy generated by the Rankin cycle for the Hyundai H25 / 33 engine increases to 10%.

With a single cogeneration unit with a Hyundai H25 / 33 engine and a recycling complex developed, it is possible to get up to 2300 kg of water vapor condensate per day, which is very valuable in Iraq.

Based on the results of the study, two variants of the technological scheme (projects A and B) were developed for the modernization of Hyundai diesel power plants. The feasibility study for the NPV method has shown that after the full recovery equipment is put into operation, the maximum achievable profit will be about 1 406 219 USD /year.

*Key words:* internal combustion engine, heat recovery, heat of exhaust gases, heat of the cooling system, steam generator, Rankin cycle.







Підп. до друку 28.09.2017 р. Формат видання 134x215. Формат паперу 60x90/16.

Папір офсет. Цифровий друк. Гарнітура Times New Roman. Обсяг авт. арк. 0,9.

Наклад 100 прим. Зам. №179

---

Надруковано у копії-центрі «МОДЕЛІСТ»  
(ФО-П Миронов М.В. Свідоцтво ВО №022953)

м. Харків, вул. Мистецтв, 3 літер Б-1

тел. 7-170-354

[www.modelist.in.ua](http://www.modelist.in.ua)