

2. Influence of Ambient Temperature Conditions on Main Engine Operation: MAN B&W Diesel A/S, Copenhagen, Denmark, 2005.
3. Thermo Efficiency System (TES) for reduction of fuel consumption and CO₂ emission: MAN B&W Diesel A/S, Copenhagen, Denmark, 2005.

Дослідження виконане за фінансової підтримки Державного фонду фундаментальних досліджень МОН України у рамках гранту Президента України.

УДК 621.436; 621.57

ОХОЛОДЖЕННЯ ПОВІТРЯ НА ВХОДІ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРА ТУРБОДЕТАНДЕРОМ

Радченко М.І., д-р техн. наук, проф., Коновалов А.В., аспірант
Національного університету кораблебудування ім. адм. Макарова, м. Миколаїв

Розроблені схеми систем охолодження повітря на вході дизель-генераторів на базі турбодетандера, що використовує надлишкову кількість наддувального повітря понад необхідну для наддуву дизеля. Показані переваги таких систем охолодження повітря.

The schemes of intake air cooling systems for diesel-generators on the base of turboexpander using the surplus charge air amount exceeding the amount of air needed for scavenging diesel engine have been developed. The advantages of such air cooling systems are shown.

Ключові слова: система охолодження повітря на вході, дизель-генератор, турбодетандер.

1. Аналіз проблеми та постановка мети дослідження. Паливна економічність дизель-генераторів (ДГ) суттєво погіршується з підвищенням температури повітря на вході їх наддувних турбокомпресорів (ТК). Так, кожні 10 °С збільшення температури зовнішнього повітря на вході дизелів призводять до зростання питомої витрати палива на 0,5...0,7 % [1, 2]. В той же час з підвищенням температури повітря на вході ДГ зростає температура відхідних газів, відповідно, й енергетичні втрати з ними. То ж цілком логічним видається використання енергії відхідних газів у холодильних машинах для охолодження повітря на вході ДГ.

Для охолодження повітря на вході ДГ доцільно застосовувати турбодетандерні установки (ТДУ). Головною перевагою ТДУ охолодження повітря на вході ДГ є використання екологічно чистого і дешевого холодоагенту — повітря. Екологічний аспект особливо важливий для стаціонарних мініелектростанцій на базі ДГ у густонаселених районах.

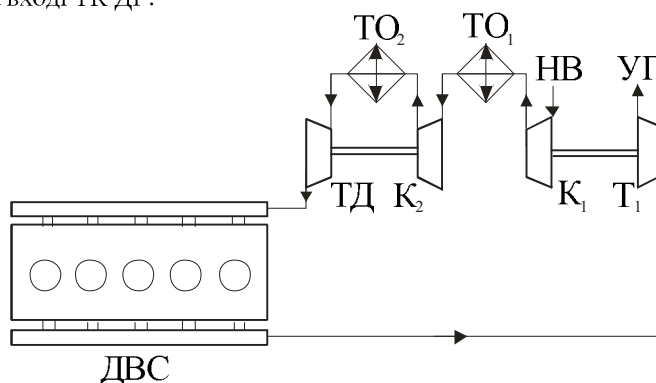
Вибір ТДУ зумовлений ще й тим, що сам турбодетандерний вузол вже присутній у ДГ, і проблема полягає в його принциповому вдосконаленні шляхом доповнення властивими йому ж елементами та розробки схем їх інтегрування в діючі системи турбонаддуву та утилізації енергії відхідних газів. Вирішення цієї проблеми вимагає зміни традиційних підходів до створення турбодетандерів: не збільшенням тиску їх наддуву (степені підвищення тиску π_k), що супроводжується неминучим падінням їх ККД η_{π_k} , а навпаки, підвищенням їх продуктивності при максимальному ККД і, відповідно, оптимальному тиску (при оптимальній величині π_k). Надлишкову ж кількість стисненого повітря (понад необхідну для наддуву) спрямовують у турбодетандер, при розширенні в якому (до атмосферного тиску) повітря охолоджується. Охоложене повітря від турбодетандера змішують із зовнішнім повітрям на вході ТК, забезпечуючи зниження температури повітря на всмоктуванні ТК при високих температурах зовнішнього повітря і, як наслідок, зростання ККД ДВЗ і, відповідно, скорочення питомої витрати палива.

Метою роботи є розробка схем турбодетандерних систем охолодження повітря на вході ДГ, які використовують енергію відхідних газів і забезпечують скорочення витрат палива.

2. Результати дослідження. Відомий єдиний варіант реалізації резерву потужності утилізаційної газової турбіни (УГТ) — понад потужність, необхідну для приводу наддувального ТК — для цілей охолодження наддувального повітря, а саме шляхом додаткового підвищення тиску наддувального повітря (понад тиск наддуву) із наступним водяним охолодженням стисненого повітря і розширенням у турбодетандері до необхідного тиску наддуву двигуна (рис. 1 [3]).

У процесі розширення стисненого повітря у турбодетандері ТД здійснюється додаткове (до водяного) охолодження наддувального повітря. Таке турбодетандерне охолодження наддувального повітря в комбінації з його проміжним водяним охолодженням застосовувалось у двигунах фірми «Купер-Бессемер» [3].

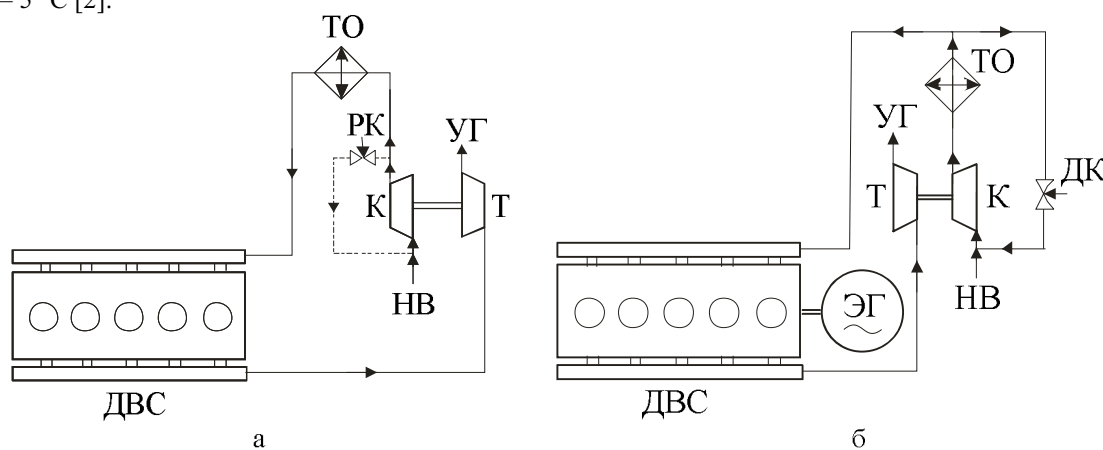
При цьому стискання повітря здійснювали у двоступеневому відцентровому компресорі, а охолодження наддувного повітря — шляхом його розширення в турбодетандері. Розширення наддувного повітря в турбодетандері ТД можливе лише за умови додаткового попереднього підвищення його тиску в компресорі K_2 , що в свою чергу — за наявності резерву потужності утилізаційної газової турбіни Т. Значення ККД газового та повітряного турбокомпресорів у турбодетандерних системах охолодження суднових дизелів «Купер–Бессемер» були доволі низькі і становили $\eta_{TK} = 0,6$ та $0,55$ відповідно (при степенях підвищення тиску компресорів π_c близько 2,7 і 1,3 відповідно), що обумовлювало невисоку ефективність турбодетандерного охолодження наддувного повітря порівняно з водяним. Та все ж турбодетандерні технології можуть бути використані для охолодження повітря, але не наддувного (традиційний спосіб), а зовнішнього повітря на вході ТК ДГ.



ДВС – двигун внутрішнього згоряння; Т – утилізаційна турбіна;
ТД – турбодетандер; $ТО_1$ і $ТО_2$ – теплообмінники-водяні охолоджувачі наддувного повітря;
 K_1 і K_2 – основний і додатковий компресори; УГ – відхідні гази; НВ – зовнішнє повітря на вході

Рис. 1 – Схема турбодетандерного охолодження наддувного повітря

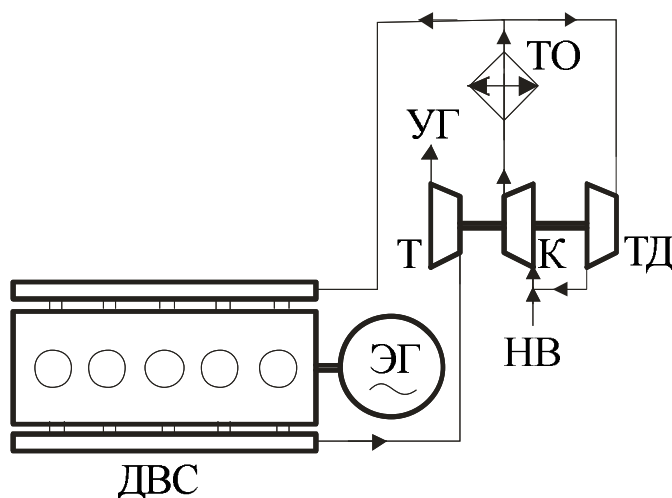
Самим простим схемним рішенням системи охолодження повітря на вході ДГ є стандартна система турбонаддуву з перепуском надлишкової кількості наддувного повітря після теплообмінника (ТО) — охолоджувача наддувного повітря на вхід ТК. Охолодження надлишкового повітря здійснюють шляхом його дроселювання (рис. 2,б). Така система за складом елементів не відрізняється від стандартної системи турбонаддуву з перепуском частини наддувного, але неохолодженого, повітря (відібраного до ТО), на вхід ТК (показано пунктиром на рис. 2,а), який застосовують для запобігання неприпустимому підвищенню тиску в циліндрах двигуна при знижених температурах зовнішнього повітря на вході ТК: $t_{не} < -5 \text{ } ^\circ\text{C}$ [2].



ЕГ – електрогенератор; ДВС – привідний двигун внутрішнього згоряння; Т – утилізаційна турбіна;
ТО – теплообмінник водяного охолодження наддувного повітря; К – компресор;
РК, ДК – регулюючий (дросельний) клапан; УГ – відхідні гази; НВ – зовнішнє повітря на вході

Рис. 2 – Схеми стандартної системи турбонаддуву з перепуском нагрітого повітря на вхід турбокомпресора (а) і системи охолодження з дроселюванням наддувного охолодженого повітря на вхід компресора (б)

Основна вада простої схеми на рис. 2,б — втрати роботи стисненого повітря при його дроселюванні, яку можна було б отримати за умови розширення повітря в турбодетандері, як це зроблено у схемі на рис. 3.



ЕГ – електрогенератор; ДВС – привідний двигун внутрішнього згоряння; Т – утилізаційна турбіна; ТД – турбодетандер; $ТО_1$ і $ТО_2$ – теплообмінники-водяні охолоджувачі наддувного повітря; K_1 і K_2 – основний і додатковий компресори; УГ – відхідні газів; НВ – зовнішнє повітря на вході

Рис. 3 – Схема двоступінчастої ТДУ охолодження повітря на вході наддувного турбокомпресора і електрогенератора

При цьому додаткова енергія наддувного повітря, одержана в свою чергу завдяки використанню надлишкової (понад необхідну для наддуву) енергії відхідних газів двигуна, використовується в турбодетандері ТД для одержання додаткової потужності, яку передають на привід наддувного компресора К. На турбодетандер подають надлишок наддувного повітря (понад його кількість, необхідну для наддуву), а основну його кількість направляють в наддувний ресивер ДГ в обхід турбодетандера.

Розрахунки показали, що при температурі повітря перед ТК ДГ $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ температура повітря на виході з турбодетандера може сягати мінус $50\text{ }^{\circ}\text{C}$.

З метою визначення резервів турбонаддуву було проведено розрахунок потужності утилізаційної турбіни N_T і компресора N_K наддувного ТК дизеля та визначено умови, за яких резерв потужності ТК достатній для використання в ТДУ охолодження повітря на вході наддувного ТК. Резерв потужності визначався як відношення $\Delta N_{TK} = (N_T - N_K) / N_K$ і ототожнювався з резервом продуктивності ТК $\Delta G_K = (G_K - G_{KH}) / G_{KH}$ 100 %, тобто надлишковою кількістю стисненого повітря, яке могло б застосовуватись як холодоагент для охолодження повітря на вході ТК.

Результати розрахунку резерву продуктивності ТК $\Delta G_K = (G_K - G_{KH}) / G_{KH}$ 100 % в залежності від температури зовнішнього повітря $t_{НВ}$ та охолодженої суміші повітря на вході в компресор $t_{\text{сум}}$ при різних π_K наведено на рис. 4. При цьому G_{KH} — продуктивність компресора, необхідна для наддуву дизеля, яку забезпечує утилізаційна турбіна при використанні відповідної частини енергії відхідних газів; G_K — продуктивність компресора, яку здатна забезпечити утилізаційна ГТ за умови повного використання енергії відхідних газів.

Як видно, резерв продуктивності ТК значний і становить $\Delta G = 40...50\text{ }%$ в інтервалі $\pi_K = 3...4$ і температур $t_{НВ} = 25...55\text{ }^{\circ}\text{C}$. При менших π_K і $t_{НВ}$ резерви продуктивності ΔG більші, що вказує на доцільність застосування ТДУ для охолодження зовнішнього повітря на вході ТК, оскільки при цьому ТК експлуатується при оптимальних (не підвищених) π_K , які відповідають максимальним ККД ТК. До того ж зниження температури зовнішнього повітря $t_{НВ}$ на вході ТК завдяки його змішуванню з повітрям, охолодженим у процесі розширення в турбодетандері, забезпечує зростання частки холодного повітря ΔG , яка подається від турбодетандера.

Результати розрахунків показали, що ТДУ забезпечує значне зниження температури повітря на вході ТК $\Delta t_{\text{в}} = 30...40\text{ }^{\circ}\text{C}$. При цьому температура повітря на виході з турбодетандера вельми низька $t_{\text{в}} = -25...-55\text{ }^{\circ}\text{C}$. Завдяки охолодженню повітря на вході ТК ДГ досягають скорочення питомої витрати палива b_e на 2...3 %. Охоложене в турбодетандері повітря можна також застосовувати для вентиляції електрогенератора, завдяки чому вилучити витрати на циркуляцію вентиляційного повітря, які становлять 2...3 % виробленої електроенергії [4].

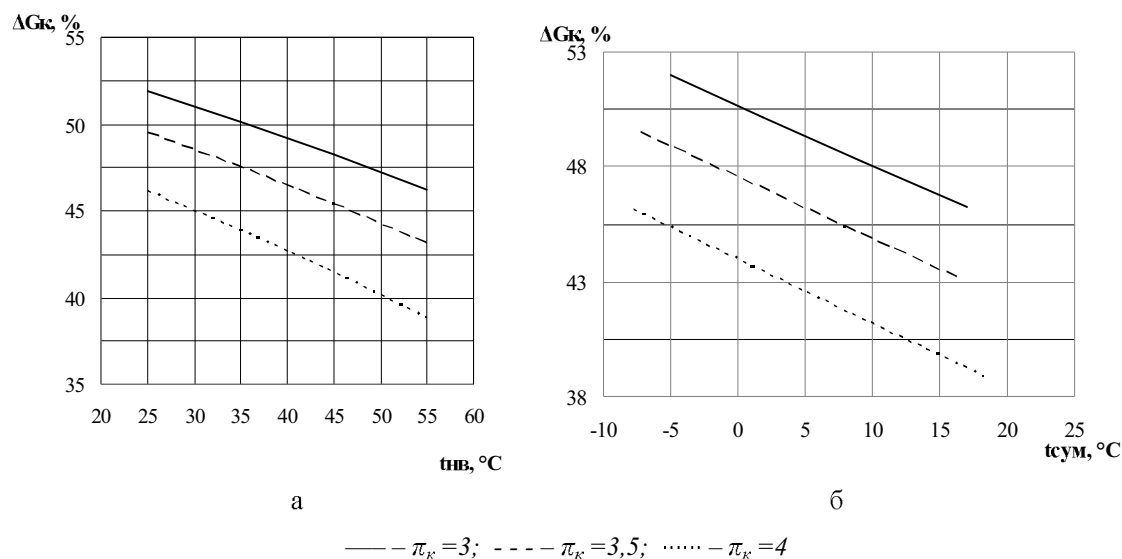


Рис. 4 – Залежності надлишку стисненого повітря ΔG_k від температури зовнішнього повітря $t_{нв}$ (а) та охолодженої суміші повітря на вході в компресор $t_{сум}$ при степенях наддуву π_k

Висновки

Розроблено схеми турбодетандерних систем охолодження повітря на вході ДГ, які використовують енергію відхідних газів, забезпечують зниження температури повітря на вході ТК на 20...30 °С і, як результат, скорочення питомої витрати палива на 2...3 %.

Література

1. Influence of Ambient Temperature Conditions on Main Engine Operation: MAN B&W Diesel A/S, Copenhagen, Denmark, 2005.
2. Thermo Efficiency System (TES) for reduction of fuel consumption and CO₂ emission: MAN B&W Diesel A/S, Copenhagen, Denmark, 2005.
3. Zinner K., Reinloin H. Thermodynamische Untersuchung über die Anwendbarkeit der Turbokühlung bei aufgeladenen vierfakt // Dieselmotoren, «MTZ». – 1964.–Nr. 5.–S.188–195.
4. Борисенко А.И. Аэродинамика и теплопередача в электрических машинах / А.И. Борисенко, В.Г. Данько, А.И. Яковлев. – М.: Энергия, 1974. – 560 с.

Дослідження виконане за фінансової підтримки Державного фонду фундаментальних досліджень МОН України у рамках гранту Президента України.

УДК 621.436: 621.57

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССОВ ОХЛАЖДЕНИЯ ВОЗДУХА НА ВХОДЕ СУДОВОГО МАЛОБОРОТНОГО ДИЗЕЛЯ ТЕПЛОИСПОЛЬЗУЮЩЕЙ ЭЖЕКТОРНОЙ ХОЛОДИЛЬНОЙ МАШИНОЙ

**Радченко Р.Н., научн. сотрудник, Охотин С.А., Казанцева В.Е., магистранты
Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова, г. Николаев**

Разработана математическая модель процессов охлаждения воздуха на входе судового малооборотного дизеля в теплоиспользующей холодильной машине, утилизирующей теплоту выпускных газов.

The mathematical model of the processes of cooling the air at the intake of marine low speed diesel engine in the waste heat recovery refrigeration system utilizing the heat of exhaust gases has been developed.

Ключевые слова: охлаждения наружного воздуха, судовой малооборотный дизель, утилизация теплоты.