

ТЕМА « ТЕПЛОВИЙ БАЛАНС ДВИГУНА»

Лекція 11

1. Мета складання теплового балансу.
2. Складові теплового балансу.
3. Розрахункові формули для визначення складових теплового балансу.
4. Значення складових теплового балансу для різних типів ДВЗ.
5. Вплив основних факторів на складові теплового балансу.
6. Шляхи поліпшення тепловикористання.

1 Мета складання теплового балансу

Тепловий баланс характеризує розподіл теплоти, яка виділяється при згорянні палива, на корисну роботу и різного роду втрати.

Складання теплового балансу має такі цілі:

- визначення величин теплових втрат з метою їх зниження;
- одержання вихідних даних для розрахунку допоміжних систем (охолодження, змащення, наддуву);
- перевірка достовірності теплового розрахунку або експериментальних досліджень.

2 Складові теплового балансу

Розрізняють зовнішній і внутрішній теплові баланси. *Внутрішній тепловий баланс* оцінює розподіл теплоти всередині двигуна і дозволяє визначити складові частини зовнішнього теплового балансу. Він дуже складний за реалізацією.

Крім того, коли тепловий баланс складається на базі теплового розрахунку, то він має назву *розрахункового*, коли за даними експериментальних досліджень, то він має назву *дослідного*.

Для складання теплового балансу на початку зображують об'єкт і *схему теплових потоків*, які мають місце в двигуні, що розглядається.

Розглянемо тепловий баланс двигуна без наддуву (рис. 1.1).

Після зображення теплових потоків проводимо замикаючий контур. Ті теплові потоки, які перетинаються контуром повинні бути врахованими.

На рис. 1.1 зображені такі потоки теплоти:

$Q_{\text{пал}}$ – теплота згоряння палива;

$Q_{\text{пов}}$ – теплота повітря, що поступає у двигун;

Q'_0 – теплота охолоджуючої рідини, що поступає у двигун;

Q'_M – теплота масла, що надходить до двигуна;
 Q''_O , Q''_M , Q_{BG} – відповідно теплота охолоджуючої рідини, масла, відпрацьованих газів, що виходять з двигуна;
 Q_e – теплота, еквівалентна ефективній роботі.

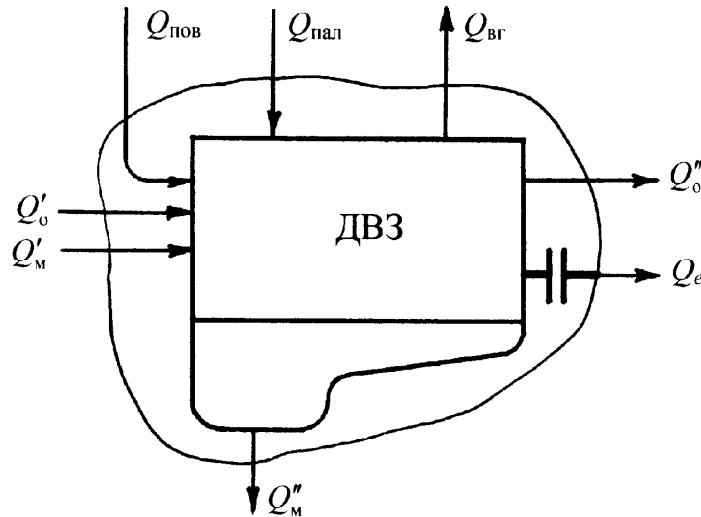


Рисунок 1.1 – Схема теплового балансу

Для наведеної схеми тепловий баланс має вигляд:

$$Q_{\text{пал}} + Q_{\text{пов}} + Q'_O + Q'_M = Q_e + Q_{BG} + Q''_O + Q''_M. \quad (1.1)$$

Коли об'єднати однойменні потоки, то маємо: $Q_O = Q''_O - Q'_O$ – втрати теплоти в систему охолодження; $Q_M = Q''_M - Q'_M$ – втрати теплоти в систему мащення; $Q_G = Q_{BG} - Q_{\text{пов}}$ – втрати теплоти з відпрацьованими газами, а тепловий баланс буде мати такий вираз:

$$Q_{\text{пал}} = Q_e + Q_G + Q_O + Q_M. \quad (1.2)$$

Крім того, необхідно врахувати втрати теплоти від неповноти згорання при $\alpha < 1$ та інші втрати. Тоді тепловий баланс буде мати такий вигляд:

$$Q_{\text{пал}} = Q_e + Q_G + Q_O + Q_M + Q_{\text{н.з}} + Q_{\text{зал}}, \quad (1.3)$$

де $Q_{\text{зал}}$ – залишковий член.

Якщо кожен складову теплового балансу поділити на $Q_{\text{пал}}$ і помножити на сто, то ми одержимо рівняння теплового балансу у відсотках:

$$q_e + q_G + q_O + q_M + q_{\text{н.з}} + q_{\text{зал}} = 100 \%. \quad (1.4)$$

3 Розрахункові формули для визначення складових теплового балансу

Розглянемо залежності для окремих складових теплового балансу.

1) Загальна кількість теплоти, що надходить до двигуна з паливом, Дж/с:

$$Q_{\text{пал}} = \frac{G_{\text{пал}}}{3,6} H_u ; \quad (1.5)$$

$$q_{\text{пал}} = 100 \%.$$

2) Теплота, еквівалентна ефективній роботі, Дж/с:

$$Q_e = 1000 \cdot N_e ; \quad (1.6)$$

$$q_e = \frac{Q_e}{Q_{\text{пал}}} \cdot 100\% ;$$

3) Теплота, що віддається охолоджуючому середовищу [1]:

$$Q_o + Q_m = C i D^{1+2m} n^m \left(\frac{1}{\alpha} \right), \quad (1.7)$$

де $C = 0,45 \dots 0,53$;

i – число циліндрів;

D – діаметр циліндру, см;

$m = 0,6 \dots 0,7$;

n – частота обертання колінчастого вала, хв^{-1} ;

α – коефіцієнт надлишку повітря.

Або

$$Q_o = G_o C_o (t_o'' - t_o') ; \quad (1.8)$$

$$q_o = \frac{Q_o}{Q_{\text{пал}}} \cdot 100\% ,$$

де G_o – секундна витрата охолоджуючої рідини, кг/с;

C_o – теплоємність (для води $C_o = 4186$ Дж/(кг·К)).

Аналогічно для масла:

$$Q_m = G_m C_m (t_m'' - t_m') ; \quad (1.9)$$

$$q_m = \frac{Q_m}{Q_{\text{пал}}} \cdot 100\% .$$

Для бензинового двигуна:

$$Q_o + Q_m = C i D^{1+2m} n^m (H_u - \Delta H_u) \left(\frac{1}{\alpha H_u} \right), \quad (1.10)$$

де ΔH_u – неповнота згорання.

4) Теплота, відведена з відпрацьованими газами:

$$Q_\Gamma = \frac{G_{\text{пал}}}{3,6} (M_2 \mu C''_{\text{рм}} t_{\text{вг}} - M_1 \mu C'_{\text{рм}} t_0), \quad (1.11)$$

де $\mu C''_{\text{рм}}$ – теплоємність відпрацьованих газів;

$\mu C'_{\text{рм}}$ – теплоємність повітря.

$$q_\Gamma = \frac{Q_\Gamma}{Q_{\text{пал}}} \cdot 100\%.$$

5) Теплота, що пов'язана з неповнотою згорання:

$$Q_{\text{н.з}} = \frac{G_{\text{пал}}}{3,6} \Delta H_u; \quad (1.12)$$

$$q_{\text{н.з}} = \frac{Q_{\text{н.з}}}{Q_{\text{пал}}} \cdot 100\%.$$

6) Залишковий член або невраховані теплові втрати:

$$Q_{\text{зал}} = Q_{\text{пал}} - (Q_e + Q_o + Q_m + Q_\Gamma + Q_{\text{н.з}}), \quad (1.13)$$

$$q_{\text{зал}} = \frac{Q_{\text{зал}}}{Q_{\text{пал}}} \cdot 100\%.$$

4 Значення складових теплового балансу в автомобільних ДВЗ

Приблизні значення складових теплового балансу на номінальному режимі роботи ДВЗ наведені у табл. 1.1 [2].

Таблиця 1.1 – Значення складових теплового балансу

Тип ДВЗ	q_e	q_Γ	q_o	q_m	$q_{\text{н.з}}$	$q_{\text{зал}}$
Бензинові	21...28	30...55	12...27	3...5	0...45	3
Дизелі без наддуву	29...42	25...45	15...35	2...3	0...5	3
Дизелі з наддувом	35...45	25...40	10...25	2...3	0...5	3

Залежно від режиму роботи двигуна відбувається перерозподіл теплоти за окремими складовими. Результати дослідного теплового балансу зображаються у вигляді графіків в залежності від n або N_e (рис. 1.2).

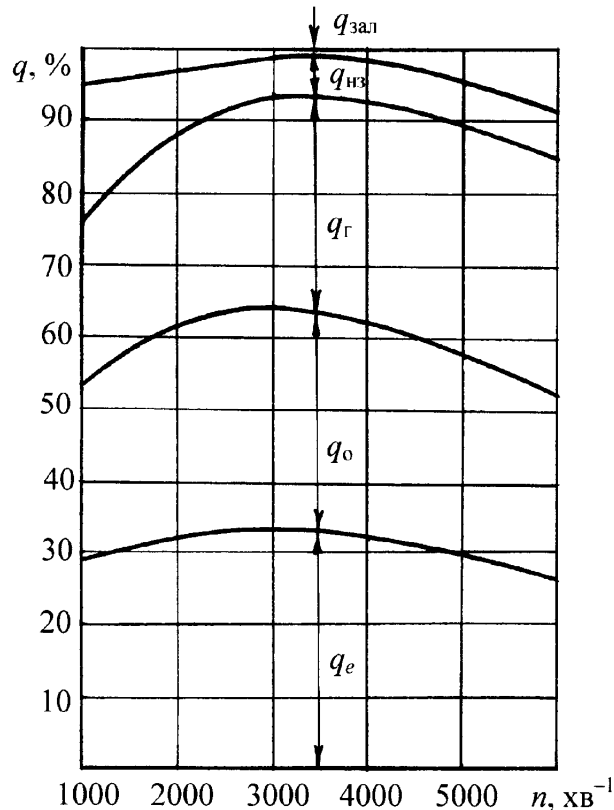


Рисунок 1.2 – Залежність складових теплового балансу бензинового двигуна від частоти обертання колінчастого вала по зовнішній швидкісній характеристиці

5 Вплив основних факторів на складові теплового балансу

На складові теплового балансу впливає велика кількість факторів. Причому часто ці фактори знаходяться в складній взаємодії, що ускладнює їх аналіз. Тому розглянемо вплив найбільш суттєвих факторів на складові теплового балансу з деякими спрощеннями.

Ступень стиску. З підвищенням ступеня стиску ε підвищується ефективність використання теплоти в циклі і підвищується $q_e = \eta_e$. При цьому відповідно знижуються втрати теплоти з відпрацьованими газами $q_{\text{г}}$, в систему охолодження $q_{\text{о}}$ і змащення $q_{\text{м}}$. В табл. 1.2 наведені складові дослідного балансу бензинового двигуна з іскровим запалюванням при різних ступенях стиску ε [3].

З аналізу таблиці бачимо, що з підвищенням ε зменшуються втрати $q_{\text{о}}$, $q_{\text{г}}$ і підвищується q_e , неповнота згорання $q_{\text{н.з}}$ залишається незмінною, а залишковий член $q_{\text{зал}}$ декілька підвищується.

Таблиця 1.2 – Вплив ступеня стиску на складові теплового балансу бензинового двигуна

Складові теплового балансу, %	Ступень стиску ϵ		
	6	7	8
q_e	23,5	25	26
q_o	24	23	22
q_{Γ}	28	26	25
$q_{н.з}$	20	20	20
$q_{зал}$	4,5	6	7

Для дизелів спостерігаються такі ж залежності, але вплив ϵ менш значний і відбувається до певного підвищення ступеня стиску ϵ_{opt} .

Частота обертання. З підвищенням n зменшується час контакту робочого тіла зі стінками і зменшується втрата теплоти в систему охолодження. З іншого боку зменшення часу приводить до зменшення ступеня охолодження відпрацьованих газів і підвищенню q_{Γ} . Цьому ж сприяє підвищена фаза догорання палива при збільшенні n . З підвищенням n збільшується середня швидкість руху поршня, що підвищує механічні втрати і втрати в систему змащення q_m .

Тиск наддування. З підвищенням тиску наддування p_k підвищується густина робочого тіла і коефіцієнт тепловіддачі від газів до стінок. Тому Q_o підвищується, але повільно, в той час як $Q_{пал}$ підвищується більш суттєво ($Q_{пал} = q_{ц}H_u$). Тому q_o зменшується. Теж саме відноситься до q_m . Що стосується втрат з відпрацьованими газами q_{Γ} , то вони залишаються практично незмінними. Це пов'язано з тим, що в дизелях при підвищенні p_k підвищується тиск у кінці стиску p_c , а для обмеження p_z зменшують ступень підвищення тиску λ ($p_z = \lambda p_c$). При цьому збільшується ступень попереднього розширення ρ , що приводить до підвищення Q_{Γ} пропорційно з підвищенням $Q_{пал}$.

6 Шляхи поліпшення тепловикористання

Аналіз складових теплового балансу дозволяє зробити висновок, що головними шляхами поліпшення тепловикористання є:

- покращання робочого процесу, ступень досконалості якого визначає $q_e = \eta_e$;
- зниження втрат в систему охолодження або їх утилізація (q_o);
- використання енергії відпрацьованих газів (q_{Γ}).

Шляхи покращання робочого процесу докладно розглядалися в першій частині курсу.

Знизити втрати теплоти в систему охолодження можна використанням так званого *високотемпературного охолодження* (ВТО) двигуна. Експериментально встановлено, що підвищення температури охолоджувача на 10 °С приводить до зниження частки відведеної теплоти в систему охолодження на 3...4 %. Необхідно відмітити, що при цьому декілька підвищується теплова напруженість деталей двигуна і частка теплоти, яка відводиться з відпрацьованими газами. Але ця частка може бути використана в газовій турбіні комбінованого двигуна. ВТО дозволяє зменшити розміри охолоджувачів (радіаторів) і потужність вентилятора і рідинних насосів.

Підвищення температури охолодження досягається використанням рідин з температурою кипіння більше 100 °С, або утворення підвищеного тиску в системі охолодження водою. В системах ВТО температура охолоджуючої рідини досягає 115...120 °С. Найбільш велике поширення ця система знайшла в тепловозних двигунах у зв'язку з обмеженими габаритами силової установки.

Іншим шляхом підвищення тепловикористання в силовій установці з ДВЗ є *адіабатизація*. В адіабатних двигунах здійснюється теплоізолювання деталей, які обмежують камеру згоряння і випускний тракт: днище поршня і головки блоку циліндрів, клапани, верхній пояс гільзи циліндрів, випускні канали. Тепло, котра не відводиться в систему охолодження і змащення, спрацьовується в газовій турбіні турбокомпресора або в силовій турбіні комбінованого адіабатного двигуна (КАД).

Показники двигуна значно підвищуються при використанні відпрацьованих газів. Використання енергії відпрацьованих газів почалося з застосування газотурбінного наддуву. Наступний етап удосконалення силової установки – це використання схеми комбінованого двигуна з силовою турбіною (турбокомпаундування). Інтенсивні роботи в цьому напрямку проводили фірми: «Броун Бовері», «Зульцер» (Швейцарія), «Лейлард» (Англія) і «Каммінс» (США).

Найбільший рівень тепловикористання досягається в силових установках з системою вторинного використання теплоти (ВВТ). Вона забезпечує глибоку утилізацію теплоти. Частіше всього системи ВВТ застосовують в комбінованих двигунах внутрішнього згоряння великої агрегатної потужності (стаціонарних, судових, тепловозних). В цих силових установках коефіцієнт використання теплоти досягає 70...90 % [4].

На рис. 1.3 представлена схема силової установки з двигуном внутрішнього згоряння і системою ВВТ.

Система ВВТ містить парогенератор, через який проходять відпрацьовані гази силової турбіни, конденсатор для конденсації пари, яка пройшла через парову турбіну і насос, який перекачує зріджену пару. В цьому контурі відбувається цикл Ренкіна. Потужність системи ВВТ складає 10...12 % потужності поршневого двигуна.



Рисунок 1.3 – Схема силової установки з системою вторинного використання теплоти:
 1 – ДВЗ; 2 – турбокомпресор;
 3 – охолоджувач наддувального повітря;
 4 – силова турбіна; 5 – редуктор;
 6 – парова турбіна; 7 – парогенератор;
 8 – конденсатор; 9 – насос

Найбільші успіхи в застосуванні системи ВВТ для наземного транспорту досягнуті корпорацією «Термо-електрон», яка розробила силову установку з двигуном МАСК ENTD-676Т ($N_{ey} = 244 \text{ кВт}$, $n = 2100 \text{ хв}^{-1}$).

Контрольні запитання

1. Що характеризує тепловий баланс ДВЗ?
2. Для чого складається тепловий баланс двигуна?
3. Назвіть складові теплового балансу. Запишіть рівняння теплового балансу ДВЗ.
4. Наведіть формули для визначення складових теплового балансу.
5. Проаналізуйте вплив ступеня стиску ϵ , частоти обертання колінчастого вала n , тиску наддуву p_k на складові теплового балансу.
6. Наведіть значення у відсотках складових теплового балансу для різних типів ДВЗ.
7. Перелічіть шляхи поліпшення тепловикористання в ДВЗ.
8. Які переваги має високотемпературна система охолодження в двигуні?
9. У чому полягає сутність адіабатизації двигуна?
10. Наведіть схему силової установки з вторинним використанням теплоти.