الباب التاسع

كيماويات الحريق Chemistry of combustion

9 - معادلات الحريق Combustion equation :

الجدول الآتى 1-9 يحتوى على أصغر جزء من المادة (الذرة) لعناصر ومركبات يحتوى عليها الوقود السائل ، وكذلك يحتوى على الوزن الذرى وعدد الذرات لكل جزئ من المادة .

Name	*Nature*	*Atomic symbol*	*Atomic weight*	*Molecular symbol*	*Molecular weight*
Carbon	Element	C	12·00	C	12·00
Hydrogen	Element	H	1·008	H_2	2·016
Oxygen	Element	O	16·00	O_2	32·00
Nitrogen	Element	N	14·01	N_2	28·02
Sulphur	Element	S	32·07	S_2	64·14
Carbon monoxide	Compound	—	—	CO	28
Carbon dioxide	Compound	—	—	CO_2	44
Sulphur dioxide	Compound	—	—	SO_2	64·07
Sulphur trioxide	Compound	—	—	SO_3	80·07
Sulphurous acid	Compound	—	—	H_2SO_3	82·086
Sulphuric acid	Compound	—	—	H_2SO_4	98·086
Water	Compound	—	—	H_2O	18·016

Table 9-1 Elements and compounds in liquid fuels and products of combustion

والجداول رقم 2-9، 3- 9 ، 4 - 9 توضح جميع المتغيرات خلال الحريق ، مع تجاهل مركبات النتروجين، وتعتبر كمية الكبريت قليلة الأهمية لعدم تأثيرها فى كمية الحرارة .

وتقدر قيمة الأكسيجين لعملية الإحتراق بمعدلات مناسبه لكل عنصر من الوقود السائل وتكون النتيجة المجموع الكلى للأكسيجين ، ويفرض أن الهواء الجوى يحتوى على نسبة 23.15% من الأكسيجين بالوزن ، 20.96 بالحجم ، وعند الضغط الجوى المطلق 1k g من الهواء يحتل حجم 0.83 من المتر المكعب عند درجة حرارة 20 مئوية ، و0.77 متر مكعب عند درجة حرارة الصفر ، وللتحويل من نظام الوحدات الفنية لقيم k cal /kg إلى نظام الوحدات العالمية SI units الآتى .

1 k cal /kg = 4.187 kilo joules /kg

example: express a fuel caloric value of 10 500 k cal /kg in SI units .

10 500k cal /kg =10 500 ×4.187kj /k g =44000k j / kg = 44Mj/kg.

9.1 - القيمة الحرارية للوقود السائل Calorific value of fuel

لا يمكن حساب القيمة الحرارية الفعلية للوقود السائل بواسطة calorimeter ولكن بالتحاليل المتاحة اللازمة ، ومن ثم يتم حساب القيمة الحرارية النظرية كالآتى .

Table 9-2 combustion equation

Nature of reaction	*Equation*	*Gravimetric meaning*
Carbon burned to carbon dioxide	$C + O_2 = CO_2$	12 kg C + 32 kg O = 44 kg CO_2
Carbon burned to carbon monoxide	$2C + O_2 = 2(CO)$	24 kg C + 32 kg O = 56 kg CO
Carbon monoxide burned to carbon dioxide	$2(CO) + O_2 = 2(CO_2)$	56 kg CO + 32 kg O = 88 kg CO_2
Hydrogen oxidised to steam	$2H_2 + O_2 = 2(H_2O)$	4 kg H + 32 kg O = 36 kg steam (or water)
Sulphur burned to sulphur dioxide	$S_2 + 2O_2 = 2(SO_2)$	64 kg S + 64 kg O = 128 kg SO_2
Sulphur dioxide burned to sulphurous acid	$SO_2 + H_2O = H_2SO_3$	64 kg SO_2 + 18 kg H_2O = 82 kg H_2SO_3
Sulphur dioxide burned to sulphur trioxide	$O_2 + 2(SO_2) = 2(SO_3)$	32 kg O + 128 kg SO_2 = 160 kg SO_3
Sulphur trioxide and water to form sulphuric acid	$SO_3 + H_2O = H_2SO_4$	80 kg SO_3 + 18 kg H_2O = 98 kg H_2SO_4

Table 9-3 Volumetric Meaning of equation

Nature of reaction	*Volumetric result*
Carbon burned to carbon dioxide	1 vol C + 1 vol O = 1 vol CO_2
Carbon burned to carbon monoxide	2 vols C + 1 vol O = 2 vols CO
Carbon monoxide burned to carbon dioxide	2 vols CO + 1 vol O = 2 vols CO_2
Hydrogen oxidised to steam	2 vols H + 1 vol O = 2 vols H_2O (steam not water)
Sulphur burned to sulphur dioxide	1 vol S + 2 vols O = 2 vols SO_2
Sulphur dioxide burned to sulphurous acid	—
Sulphur dioxide burned to sulphur trioxide	—
Sulphur trioxide and water to form sulphuric acid	—

Table 9-4 heat evolved by combustion

Nature of reaction	*Thermo-chemical equation*	*Heat evolved per kg of element burned* kcal/kg
Carbon burned to carbon dioxide	$C + O_2 = CO_2 + 96900$	8080
Carbon burned to carbon monoxide	$2C + O_2 = 2(CO) + 58900$	2450
Carbon monoxide burned to carbon dioxide	$2(CO) + O_2 = 2(CO_2) + 315000$	5630 (per kg CO burned)
Hydrogen oxidised to steam	$2H_2 + O_2 = 2(H_2O) + 136000$	33900 (a) 29000 (b)
Sulphur burned to sulphur dioxide	$S_2 + 2O_2 = 2(SO_2) + 144000$	2260
Sulphur dioxide burned to sulphurous acid	—	—
Sulphur dioxide burned to sulphur trioxide	—	—
Sulphur trioxide and water to form sulphuric acid	—	—

Note. (a) Value if the latent heat of the steam formed is to be *included*.
(b) Value if the latent heat of the steam formed is to be *excluded*.

Table 9-5

Fuel	*H:C ratio*	*Calorific value kJ/kg*
Methane	4:1	55 500
Ethane	3:1	51 900
Propane	2.7:1	50 400
Kerosene	1.9:1	43 300
Heavy fuel	1.5:1	42 500
Benzene	1:1	42 300
Coal	0.8:1	33 800

ودائما مع التجربة نحصل على قيم متغيرة حقيقية ، وربما يوجد تناقض بسيط لأسباب مختلفة لا نحتاج تتبع أثرها الآن .

$$\text{Calorific value in k cal /kg of fuel} = \frac{8100\,c + 34000\,(h - \frac{0}{8})}{100}$$

حيث أن C , H , O نسب لهذه العناصر لكل واحد كيلوجرام من الوقود السائل وينتج الكربون 8080 k cal /kg عند عملية الحريق الكامل ، والهيدروجين 34000 kcal /kg ، وبفرض أن الأكسيجين يتحد بنسب مع الهيدروجين بمعنى أن كمية الهيدروجين تساوى واحد من ثمانية بالوزن من الأكسيجين ، وبفرض أن مركبات الكبريت لها حريق غير مؤثرعلى أكسيد النتروجين ، ويوجد فى هذه المعادلة إختلافات عديدة ومنها على سبيل المثال .

$$\text{Calorific value in k cal/kg} = 7500\,C + 33800\,(H - \frac{O}{8})$$

حيث أن C , H , O تكون جزء من واحد صحيح من الكيلوجرام لكل كيلوجرام من الوقود كما أن القيمة الحرارية التى يتم حسابها بجهاز الكالوريميتر calorimeter تتم بالقيمة الحجمية بمعنى أنها تشمل الحرارة الكامنة لبخار الوقود عند حرق الهيدروجين ، وللحصول على القيمة القياسية تطرح الحرارة الكامنة للبخار من القيمة الحرارية الكلية وذلك للحصول على القيمة الحرارية الصافية وعادة ما يكون فيه إختلاف بين القيمة الحجمية والقيمة الصافية from kcal /kg 600 to 700 وتعتمد القيم الحرارية الحجمية على نسبة الهيدروجين وعادة ماتكون من 10700 kcal /kg إلى 10550 لوقود الديزل على فرض أن القيمة الحرارية هى 10 750 .

والقيمة الحرارية لوقود الغاز gas oil from 10700 to10900 kcal/ kg ، ووقود الغلايات from 10300 to 10450 kcal/kg وعندما تتوافر المعلومات المعملية فإن الثقل النوعى للوقود يكون عامل مفيد تقريبا للدلالة على القيمة الحرارية . والجدول الآتى يوضح العلاقة بين القيمة الحرارية الحجمية والكثافة النوعية عند $15C^o$.

Specific gravity at 15 c^0	=0.85	0.89	0.91	0.93
Gross cal . val . k cal/kg	=10 900	10 800	10 700	10 500

واذا كانت درجة الحرارة الحقيقية للثقل النوعى أزيد من $15c^o$ فإنه للحصول على مكافئ الثقل النوعى عند درجة الحرارة $15c^o$ يضاف 0.00063 لكل درجة حرارة زيادة عن درجة الحرارة $15c^o$ وبالمثل اذا كانت درجة الحرارة الحقيقية أقل من $15c^o$ يطرح 0.000 63 من الثقل النوعى لكل درجة حرارة ناقصة ، ويقاس الوقود المحترق بالوزن ، ولكن يخزن الوقود فى تنكات وتقاس بالحجم وتعرف بالسعة التخزينية للتنك ، ووزن الوقود يحدد بواسطة إستخدام

الهيدروميتر للحصول على الثقل النوعى للوقود ، وبتوضيح فإن النسب المتوسطة لمركب وقود الديزل يتكون من - 0.86 -87 كربون ، 11.0 – 13.5 هيدروجين ، 0.5 – 2.0 كبريت ، 0.5 – 1.0 لكل من الأكسيجين والنتروجين ، والطاقة الحرارية الكبيرة من الإحتراق تنتج من إحتراق عنصر الهيدروجين والوقود الذى يملك نسبة هيدروجين أعلى ، وينتج عنه كمية حرارة كبيرة . كما هو موجود فى جدول 5-9 .

9.2 - حساب الإتزان الحرارى للمحرك Balance and thermal calculation heat of engine

9-2a - الإتزان الحرارى شكل 9. 1 .

التحليلات الآتية لدوائر المحرك جزء من إنتاج حريق باستخدام الوقود لأداء شغل مؤثر ولتحديد الإستفادة الطبيعية للحرارة وطرق تحسينها ، وأيضًا المعلومات المطلوبة لتصميم دوائر التبريد يجب معرفة كيفية إنتاجها وإستخدامها مع هذه الأهداف المنظورة والخطة الجيدة تكون بإيجاد المكونات الفردية للإتزان الحرارى ومهام القيم المتغيرة المختلفة التى تصف حالات التشغيل (الحمل ، السرعة ، الحريق) .

ومعادلة الاتزان الحرارى لكمية الحرارة بالنسبة لوحدة الوقت تأخذ الشكل هكذا .

$$Q_{tot} = Q_b + Q_{cool+} + Q_{gas} + Q_{ic} + Q_{oil} + Q_{res} \qquad 9\text{-}1$$

Where Q_t = total amount of heat introduce into an engine with the fuel at the given duty .

Q_b = heat equivalent to the effective (brake) work of the engine .

Q_{cool} = heat rejected to the cooling medium

Q_{gas} = heat carried away from the engine with the exhaust gases .

Q_{ic} = part of the heat lost owing chemically incomplete combustion .

Q_{oil} = heat rejected to the oil .

Q_{res} = term showing the residual losses discharged in the other members of the heat balance equation .

9.2b- كمية الحرارية الكلية المنتجة من الممكن أن تقاس بنسبة فى المائة % هكذا كالآتى .

$q_b = \frac{Q_b}{Q_{tot}} 100\ \%$; $q_{cool} = \frac{Q_{cool}}{Q_{tot}} 100\ \%$; $Q_{gas} = \frac{Q_{gas}}{Q_{tot}} 100\ \%$.

$q_{ic} = \frac{Q_{ic}}{Q_{tot}} 100\ \%$; $Q_{oil} = \frac{Q_{oil}}{Q_{tot}} 100\ \%$; $Q_{res} = \frac{Q_{res}}{Q_{tot}} 100\ \%$ 9-2

obviously

$q_b + q_{cool} + q_{gas} + q_{ic} + q_{oil} + q_{res} = 100\ \%$ 9-3

9.2c - كمية الحرارة المفقودة فى الثانية .

$Q_{tot} = H_l\ G_f$ j/ sec 9-4

حيث أن G_f تكون بالكيلوجرام / الثانية ، H_l تكون بالجول / الكيلوجرام .

$Q_{tot} = H_l\ G_f$ Kcal / hr

hence H_1 is an kcal / hr and G_f in kg / hr

المكافئ الحرارى للشغل المؤثر فى الثانية .

$Q_b = N_b$ watts or j /sec 9-5

$Q_b = 632\ N_b$ Kcal / hr

حيث أن N_b بالحصان .

الحرارة المفقودة فى دائرة التبريد خلال جدران الإسطوانة ورأس الإسطوانات ، المكابس والشنابر عندما يبرد المحرك بالماء العذب يمكن حسابها من المعادلة الآتية .

$Q_w = G_w\ c_w\ (t_{out} - t_{in})$ j /sec 9-6

ومن الممكن أن يكون الناتيج فى المعادلة السابقة kcal / kg

where G_w = amount of water passed through the engine . kg / sec .

c_w = specific heat of water , j / kg ;

c_w = 4.187 j / kg ;

t_{out} = temperature of the water flowing out of the engine , C^o.

t_{in} = temperature of the water flowing into the engine , C^o.

$Q_w = G_w c_w\ (t_{out} - t_{in})$ kcal / hr ;

Where G_w is in kg /hr and c_w is about 1 kcal /kg

9-2d - كمية الحرارة المفقودة من غاز العادم .

$Q_{gas} = G_f\ [\ M_2\ (\mu c_p'')\ t_{gas} - M_1\ (\mu c_p)\ t_0\ ]$ j / sec 9-7

Where $G_f\ M_2\ (\mu c_p'')\ t_{gas}$ = amount of heat carried away from the cylinder together with the exhaust gases j /sec .

$G_f\ M_1(\mu c_p)\ t_0$ = amount of heat admitted into the engine cylinder together with the fresh charge , j / sec .

$\mu c_p''$ = molar heat capacity of the combustion products at constant pressure j / (k mole. Deg) .

μc_p = molar heat capacity of the fresh air charging at constant, j / (k mole. deg) .

t_{gas} = temperature of the exhaust gas measured after the exhaust pipe, C^0.

t_0 = temperature of the fresh air charging at the cylinder intake , C^0.

The formula 9-7 has the same form , but G_f should be expressed in kg / hr and the specific heat (heat capacity) in kcal / (k mole. deg) here Q_{gas} is measured in kcal / hr .

شكل 1-9 يبين الرسم التخطيطى للاتزان الحرارى لمحرك الديزل .

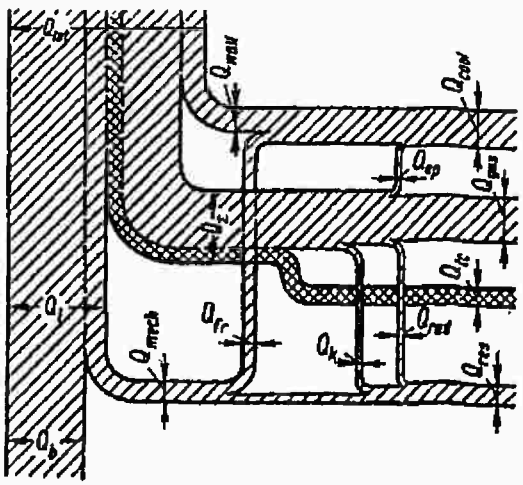

Figure 9-1

Q_{tot} = heat introduce into the engine with the fuel .

Q_i = heat equivalent to the indicator work of the engine.

Q_b = heat equivalent to the effective (brake) work of the engine .

Q_{wall} = heat transferred to the internal cylinder walls .

Q_{cool} = heat rejected to the cooling medium .

Q_{Σ} = total heat contained in the exhaust gas .

Q_{mech} = heat equivalent to the work spend on friction and driving the auxiliary mechanisms .

Q_{fr} = heat transferred to the cooling medium owing to friction of the piston and its rings .

Q_{ic} = heat of the fuel lost owing to chemically incomplete combustion .

Q_{res} = residual term .

Q_k = heat corresponding to the kinetic energy of the exhaust gases .

Q_{rad} = heat lost as result of radiation .

Q_{ep} = heat rejected by the spend gases to the cooling system in the exhaust pipe .

Q_{gas} = heat carried away from the engine with the exhaust gases.

حيث أن قيمة Q_{oil} تحدد بحساب كمية الحرارة المنقولة من الزيت إلى المياه فى مبرد الزيت .

كما أن Q_{ic} فى القانون لا تحسب منفصلة عندما تكون $\propto \geq 1$ ولكن تحسب ضمن الغازات المتبقية Q_{res} والتى من الممكن أن تتواجد من الإختلاف .

$$Q_{res} = Q_{tot} - (Q_b + Q_w + Q_{gas} + Q_{oil}) \qquad 9\text{-}8$$

وإذا كانت الإختبارات محسوبة على أساس $\propto < 1$ فإن الحرارة لاتكون ذات منفعة بسبب التفاعل الكميائى للحريق الكامل ويحسب من المعادلة الآتية .

$$Q_{ic} = \Delta H_l.\text{chem}\ G_f \qquad \text{j /sec} \qquad 9\text{-}9$$

حيث أن $\Delta H_l.\text{chem}$ تحسب من المعادلة الآتية .

$$\Delta H_l.\text{chem} = (\Delta H_l)_{co} + (\Delta H_l)_{H2} .$$

حيث أن co اول أكسيد الكربون ، H_2 الهيدروجين

ويعبر عن $\Delta_{Hl}.\text{chem}$ بالآتى kcal / kg و G_f من الممكن أن نعبر عنها kcal / hr .

ومكونات الإتزان الحرارى لمحركات آلآت الإحتراق الداخلى موضحة بالجدول 6 -9.

والجدول 6 - 9 يعطى قيم تقريبية لمكونات الإتزان الحرارى .

Table 9-6

COMPONENTS OF HEAT BALANCE IN PER CENT

Engine	$q_b = \eta_b$	q_{cool}	q_{gas}	q_{ic}	q_{res}
Spark-ignition	21-28	12-27	30-55	0-45	3-10
Diesel	29-42	15-35	25-45	0-5	2-5

9-2e - حساب كمية الهواء المستخدمة فى حرق 1 كيلوجرام ديزل حريقاً كاملا فى محركات الديزل .

بإعتبار أن حدوث العمليات فى المحركات منفصلة فى هذه الحالة يمكن تحديد الحسابات المتوقعة للكميات متغيرة القيمة فى دوائر التشغيل ، قدرة المحرك والأداء وضغط الغازات حيث غرفة الإشتعال أعلى المكبس تعتمد على زاوية شوط عمود المرفق وهذا أيضًا يستخدم فى إيجاد الأبعاد الأساسية للمحرك (قطر اللإسطوانة وشوط المكبس) ومراجعة حسابات المتانة للمكونات الرئيسية . فى الحساب الحرارى يكون من الضرورى إختيار البيانات الإبتدائية الصحيحة . والحساب يجب أن يكون مأخوذ من السرعة وعوامل أخرى خاصة فى حالة تشغيل المحرك .

مثلا : الحساب الحرارى لمحرك ديزل مبين أسفل .

مثال : الحساب الحرارى لأداء محرك ديزل ، يستخدم للحصول على البيانات الآتية: وجود الأبعاد الرئيسية والأداء المتوقع للمحرك ، والبيانات الإبتدائية .

معدل القدرة عند عدد لفات 450 لفة / دقيقة 4500 hp وعدد الإسطوانات 12 V ونسبة الإنضغاط 10.5 .

The excess air coefficient $\alpha = 0.9$

وقود الديزل 0.87 CO , 0.13 H .

القيمة الحرارية لوقود الديزيل 44 MJ / kg , 10750 kcal / kg .

كمية الهواء النظرية المطلوبة لحرق واحد كيلوجرام من الوقود .

$a_{th} = \frac{1}{0.225} \left(\frac{8}{3} c + 8 H - o_f \right) = \frac{1}{0.225} \left(\frac{8}{3} \times 0.87 + 8 \times 0.13 \right)$
14.93 kg .

Note . when calculating a_{th} , the content of oxygen in air is taken equal to 0.225 .

9-2f - الكمية الحقيقية العملية للهواء عند حرق 1 كيلوجرام من وقود الديزل عندما تكون $\propto a = 0.9$.

$\propto a_{th} = 0.9 \times 14.96 = 13.46$ kg

كمية الهواء النقى المخلوط .

$G_1 = 1 + \propto a_{th} = 1 + 13.46 = 14.46$ kg .