

ВЛИЯНИЕ СОСТАВА ГОРЮЧЕГО СЛАНЦА-КУКЕРСИТА НА ТЕПЛОВЫЕ ПОТЕРИ С ПРОДУКТАМИ СЖИГАНИЯ

Э. ЛАНДРА

Состав сланца-кукерсита зависит от его месторождения, метода выемки и обогащения.

Содержание горючей части в рабочей массе сланца-кукерсита $\Gamma = 16 \dots 38\%$, но его можно значительно повысить обогащением. При этом элементарный состав горючей массы колеблется в узких пределах [1] и его можно рассматривать как независимого от месторождения, метода выемки и обогащения.

Влажность сланца-кукерсита в рабочей массе $W = 10 \dots 15\%$, но при мокром обогащении она может увеличиться.

Минеральная часть сухого сланца-кукерсита в зависимости от месторождения и метода выемки $A = 62 \dots 84\%$. Рабочая масса сланца-кукерсита с содержанием минеральной части выше 80% имеет теплотворность Q_n ниже 1500 ккал/кг и в качестве топлива, как правило, не применяется. Содержание минеральной части можно уменьшить обогащением.

Знание зависимости тепловых потерь при сжигании от состава сланца-кукерсита позволяет точнее оценить метод выемки или обогащения сланца-кукерсита данного месторождения.

Для определения к.п.д. энергетических установок или тепловых потерь имеются некоторые упрощенные методы. Можно сослаться на работы проф. С. Я. Корницкого, проф. А. М. Гурвича и проф. М. Б. Равича [2, 3, 4]. Для некоторых видов топлива можно использовать построенные авторами номограммы [5, 6]. Имеется сравнительно точный метод для подсчета потерь тепла с уходящими газами, который учитывает изменение влажности топлива [7].

Все названные методы имеют целью более или менее точное определение к.п.д. или потерь тепла с уходящими газами для проверки работы конкретных установок, но не являются удобными для анализа влияния изменения состава топлива на к.п.д. или на тепловые потери. Этот вопрос имеет особое значение при сжигании такого многозольного топлива, как сланец-кукерсит.

Ниже исследуется влияние состава сланца-кукерсита на теплосодержание уходящих газов Q_2 и теплосодержание золы Q_6 , причем $Q_{2+6} = Q_2 + Q_6$.

Чтобы выяснить влияние на потери каждой составляющей, необходимо определить теплосодержание продуктов сжигания 1 кг горючей массы, минеральной части и влаги отдельно, а при суммировании теплосодержаний умножить каждый вид на коэффициент, показывающий содержание данной составляющей в рабочем топливе.

В общем случае теплосодержание уходящих газов и золы при сжигании горючего сланца можно выразить формулой:

$$Q_{2+6} = [I_r + I_a \cdot (\alpha - 1)] \left(1 - \frac{q_4}{100} \right) \frac{\Gamma}{100} + 1,24 I_{H_2O} \frac{W}{100} + \\ + 0,509 I_{RO_2} \cdot a \cdot k \cdot \frac{A}{100} + I_{зл} \cdot a_{ун} (1 - a \cdot k) \frac{A}{100} + \\ + I_3 \cdot (1 - a_{ун}) \cdot (1 - a \cdot k) \frac{A}{100} \quad [\text{ккал/кг}], \quad (1)$$

где Q_{2+6} — теплосодержание уходящих газов и золы в ккал на 1 кг рабочего топлива,

Γ — содержание горючей массы в рабочем топливе, %,

W — содержание влаги в рабочем топливе, %,

A — содержание минеральных веществ в рабочем топливе, %,

I_r — теплосодержание продуктов горения горючей массы топлива при температуре уходящих газов t_{yx} в ккал на 1 кг горючей части, с учетом теплосодержания холодного воздуха,

I_a — теплосодержание воздуха, теоретически необходимое для полного сжигания 1 кг горючей массы топлива, при температуре уходящих газов t_{yx} в ккал на 1 кг горючей части, с учетом теплосодержания холодного воздуха,

I_{H_2O} — теплосодержание 1 нм³ водяных паров при температуре уходящих газов t_{yx} , ккал/нм³,

I_{RO_2} — теплосодержание 1 нм³ углекислого газа при температуре уходящих газов t_{yx} ккал/нм³,

I_3 — теплосодержание 1 кг золы при температуре удаления золы $t_3 = 600^\circ \text{C}$, ккал/кг,

$I_{зл}$ — теплосодержание 1 кг золы при температуре уходящих газов, ккал/кг,

α — коэффициент избытка воздуха,

q_4 — механический недожог, %,

a — содержание углекислого газа в минеральной части топлива,

$$a = \frac{CO_2}{A} [\text{кг/кг}],$$

k — коэффициент разложения карбонатов,

$a_{ун}$ — коэффициент уноса золы,

1,24 — объем 1 кг водяных паров нм³/кг,

0,509 — объем 1 кг углекислого газа нм³/кг.

Для упрощения анализа этой формулы можно принять следующие допущения.

Элементарный состав горючей массы сланца-кукерсита, в зависимости от месторождения и метода выемки, колеблется в узких пределах, и его можно считать постоянным. Теплосодержание продуктов сгорания горючей массы I_r зависит, следовательно, только от температуры уходящих газов.

Содержание углекислого газа в минеральной части сланца-кукерсита $a = 0,23 \dots 0,33$ и в среднем принимается $a = 0,27$. Коэффициент разложения карбонатов сланца-кукерсита $k \approx 0,7$, при слоевом и $k \approx 1,0$ при пылевидном сжигании. Коэффициент уноса золы принимается $a_{\text{ун}} = 0$ при слоевом и $a_{\text{ун}} = 0,7$ при пылевидном сжигании.

На основе этих данных по нормативному методу [8] можно определить теплосодержание продуктов сжигания Q_{2+6} при данной температуре уходящих газов.

В общем виде формула (1) следующая:

$$Q_{2+6} = b \cdot \Gamma + m \cdot W + n \cdot A \quad [\text{ккал/кг}], \quad (2)$$

где b, m, n — коэффициенты, зависящие от температуры уходящих газов.

Температура уходящих газов при слоевом сжигании топлива редко превышает 400°C , а при пылевидном сжигании 200°C ; нижний предел температуры уходящих газов составляет 100°C . В этих пределах температур уходящих газов зависимости коэффициентов b, m, n от t_{yx} можно рассматривать как приближенно линейные. Для каждого интервала температур уходящих газов можно найти соответствующую прямую, которая с достаточной точностью дает b или m или n , и определить уравнение этой прямой.

В результате расчетов при пылевидном сжигании ($t_{\text{yx}} = 100 \dots 200^\circ \text{C}$) сланца-кукерсита теплосодержание Q_{2+6} может быть выражено формулой

$$Q_{2+6} = [(3,35t_{\text{yx}} - 102) + (2,84t_{\text{yx}} - 88)(a - 1)] \left(1 - \frac{q_4}{100}\right) \frac{\Gamma}{100} + \\ + (0,455t_{\text{yx}} - 0,87) \frac{W}{100} + (0,170t_{\text{yx}} + 27,8) \frac{A}{100} \quad [\text{ккал/кг}] \quad (3)$$

и при слоевом сжигании горючего сланца ($t_{\text{yx}} = 100 \dots 400^\circ$) —

$$Q_{2+6} = \{ (3,32t_{\text{yx}} - 103,8)[1 + 0,86(a - 1)] \} \left(1 - \frac{q_4}{100}\right) \frac{\Gamma}{100} + \\ + (0,465t_{\text{yx}} - 2,6) \frac{W}{100} + (0,045t_{\text{yx}} + 107,8) \frac{A}{100} \quad [\text{ккал/кг}]. \quad (4)$$

Погрешность результатов расчетов по формулам (3) и (4) в этих пределах t_{yx} по сравнению с данными, полученными по нормативному методу теплового расчета, не превышает 0,4%.

Для анализа влияния состава топлива на тепловые потери с продуктами сжигания формулы (3) и (4) недостаточны, так как эти потери зависят от располагаемой теплотворной способности топлива и определяются по формуле

$$q_{2+6} = \frac{Q_{2+6}}{Q_p}. \quad (5)$$

Для сланца-кукерсита Q_p выражается формулой

$$Q_p = Q_{нг} \cdot \frac{\Gamma}{100} - 6W - Q_{CO_2} \cdot a \cdot k \cdot A \text{ [ккал/кг]}, \quad (6)$$

где $Q_{нг}$ — низшая теплотворная способность горючей массы топлива, для сланца-кукерсита $Q_{нг} = 8320$ ккал/кг;

Q_{CO_2} — тепло разложения карбонатов, для сланца-кукерсита $Q_{CO_2} = 9,7$ ккал/1% CO_2 .

Наряду с разложением карбонатов в минеральной части сланца кукерсита могут иметь место и другие сложные химические реакции, но суммарный тепловой эффект этих реакций в первом приближении можно не учитывать.

Если предполагать, что $\Gamma + W + A = 100$, то можно из формулы (6) элиминировать одну из составляющих топлива, например Γ . После замены $Q_{нг}$, а также коэффициентов a и k цифровыми данными формула (6) приобретает следующий вид:

$$Q_p = 8320 - 89,2W - 85,82A \text{ [ккал/кг]} \quad (7)$$

при пылевидном сжигании, а при слоевом сжигании

$$Q_p = 8320 - 89,2W - 85,03A \text{ [ккал/кг]}. \quad (8)$$

К аналогичной форме можно привести и формулу (3) или (4).

Если взять $\alpha = 1$, $q_4 = 0$ и $t_{yx} = 300^\circ C$ и учитывать условие $\Gamma + W + A = 100$, то формула (4) преобразуется к следующему виду:

$$Q_{2+6} = 893 - 7,560W - 7,717A \text{ [ккал/кг]}. \quad (9)$$

Таким образом, в общем случае можно написать выражение для определения потерь с уходящими газами и золой в следующем виде:

$$q_{2+6} = \frac{Q_{2+6}}{Q_p} = \frac{C - mW - nA}{D - uW - vA}. \quad (10)$$

При определенном значении Q_p в общем случае q_{2+6} зависит от отношения W и A , которые могут изменяться в некоторых пределах. Можно найти условия, при которых q_{2+6} при постоянном Q_p не зависит от соотношения W и A .

Из зависимости

$$Q_p = D - uW - vA$$

получаем

$$A = \frac{D - Q_p}{v} - \frac{u}{v}W, \quad (11)$$

а соответственно из

$$Q_{2+6} = C - mW - nA$$

получаем

$$A = \frac{C - Q_{2+6}}{n} - \frac{m}{n} W. \quad (12)$$

Из формулы (10) и (11) получается

$$\frac{D - Q_p}{v} - \frac{C - Q_{2+6}}{n} = \left(\frac{u}{v} - \frac{m}{n} \right) W. \quad (13)$$

Так как рассматривается случай постоянного Q_p , то левая часть уравнения (13) состоит из постоянных слагаемых. При переменном W это уравнение выполняется только в случае, если

$$\frac{u}{v} = \frac{m}{n}. \quad (14)$$

При слоевом сжигании сланца-кукерсита

$$\frac{u}{v} = \frac{89,2}{85,03} = 1,049,$$

при пылевидном сжигании

$$\frac{u}{v} = \frac{89,2}{85,82} = 1,039.$$

В общем, конечно,

$$\frac{u}{v} \neq \frac{m}{n}.$$

Для выполнения условия (14) можно коэффициент m или n в формуле (10) разбить на две части таким образом, что выполняется условие (13). Например, уравнение (9) можно написать в виде ($t_{yx} = 300^\circ \text{C}$)

$$\begin{aligned} Q_{2+6} &= 893 - 7,560W - 7,717A = \\ &= 893 - 7,560W - 7,207A - 0,510A \text{ [ккал/кг]}. \end{aligned} \quad (15)$$

Формула (15) без последнего слагаемого удовлетворяет условию (14). Эту часть можно использовать для расчета условных потерь q'_{2+6} , которые не зависят от соотношения W и A , а только от температуры уходящих газов и располагаемой теплотворности сланца Q_p .

Предположим первоначально, что $\alpha = 1$, и определим зависимость q'_{2+6} от Q_p при различных температурах уходящих газов и различных значениях q_4 . На графике с логарифмическим масштабом эти кривые можно заменить прямыми (рис. 1). Из этого следует, что q'_{2+6} можно приближенно выразить формулой

$$q'_{2+6} = p \cdot (Q_p)^t. \quad (16)$$

Угловой коэффициент, который соответствует степени t в формуле (16), мало зависит от t_{yx} и от потерь механического недожога q_4 . Величина его довольно близка к $-0,5$ (см. рис. 1).

Коэффициент p , который на рис. 1 соответствует точке пересечения прямой с осью ординат, зависит от t_{yx} , а также от q_4 (рис. 2).

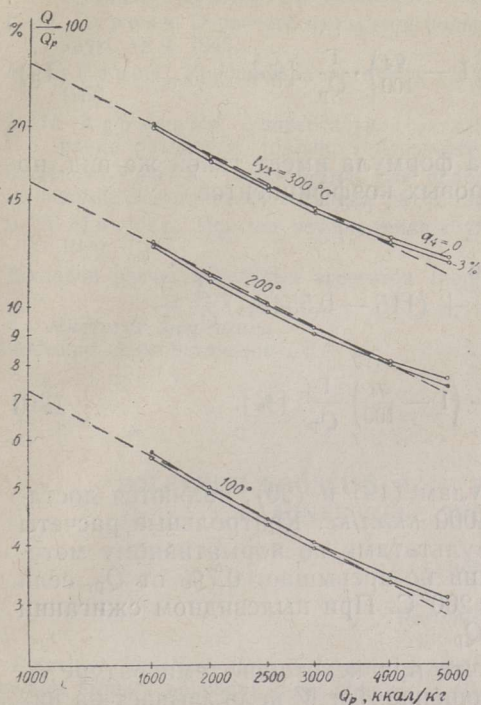


Рис. 1. $q_{2+6} = f(Q_p^p)$ при пылевидном сжигании сланца-кукерсита при $\alpha = 1$.

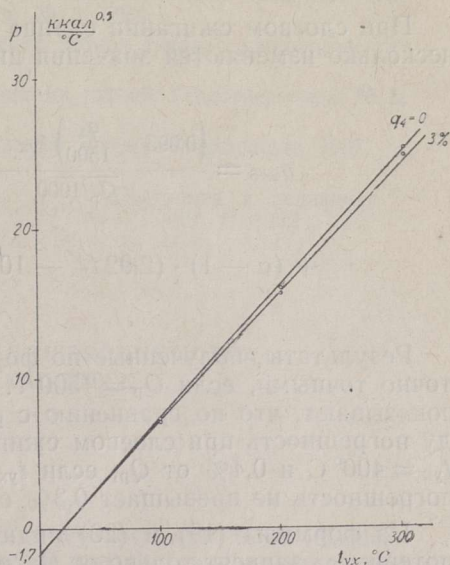


Рис. 2. $p = f(t_{yx})$ при пылевидном сжигании сланца-кукерсита (формула 17).

Эта зависимость линейна и ее можно выразить формулой

$$p = \left(0,0905 - \frac{q_4}{1000}\right) \cdot t_{yx} - 1,7. \quad (17)$$

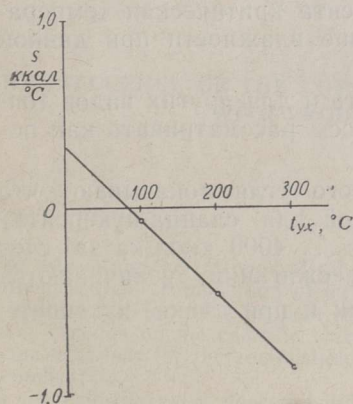


Рис. 3. $s = f(t_{yx})$ при пылевидном сжигании сланца-кукерсита (формула 18).

Чтобы получить формулу для q_{2+6} , необходимо учитывать последнее слагаемое в формуле типа (15). Коэффициент этого слагаемого зависит от температуры уходящих газов, что видно из формулы (3). Эта линейная зависимость представлена на рис. 3; ее можно выразить формулой

$$s = 0,32 - 0,0039 t_{yx}. \quad (18)$$

Дополнительно следует учитывать влияние избытка воздуха. Для этого можно пользоваться вторым слагаемым формулы (3).

В конечном итоге потери с продуктами сжигания сланца-кукерсита при пылевидном сжигании выразятся формулой

$$q_{2+6} = \frac{\left(0,0905 - \frac{q_4}{1000}\right) t_{yx} - 1,7}{\sqrt{Q_p/1000}} + (32 - 0,39 t_{yx}) \frac{A}{Q_p} +$$

$$+ (\alpha - 1) \cdot (2,84 t_{yx} - 88) \left(1 - \frac{q_4}{100}\right) \cdot \frac{\Gamma}{Q_p} \quad [\%]. \quad (19)$$

При слоевом сжигании сланца эта формула имеет такой же вид, но несколько изменяются значения цифровых коэффициентов

$$q_{2+6} = \frac{\left(0,095 - \frac{q_4}{1500}\right) t_{yx} - 2,9}{\sqrt{Q_p/1000}} + (115 - 0,554 t_{yx}) \frac{A}{Q_p} +$$

$$+ (\alpha - 1) \cdot (2,92 t_{yx} - 103) \cdot \left(1 - \frac{q_4}{100}\right) \cdot \frac{\Gamma}{Q_p} \quad [\%]. \quad (20)$$

Результаты, полученные по формулам (19) и (20), являются достаточно точными, если $Q_p = 1500 \dots 4000$ ккал/кг. Контрольные расчеты показывают, что по сравнению с результатами по нормативному методу погрешность при слоевом сжигании не превышает 0,7% от Q_p , если $t_{yx} = 400^\circ\text{C}$ и 0,4% от Q_p , если $t_{yx} = 200^\circ\text{C}$. При пылевидном сжигании погрешность не превышает 0,3% от Q_p .

Из формулы (19) и (20) видно, что при некоторой температуре t_{yx} потери q_{2+6} зависят только от Q_p , отношение A и W не оказывает на них влияния. При слоевом сжигании сланца-кукерсита, например, если $\alpha = 1$, такой критической температурой является 210°C . При увеличении α эта температура уменьшается, например, если $\alpha = 2$, то она $\approx 175^\circ\text{C}$.

Если t_{yx} ниже критической, то при данной теплотворности увеличение влажности за счет зольности сланца-кукерсита сопровождается уменьшением потери q_{2+6} . Если t_{yx} выше критической, то наоборот, увеличение влажности за счет зольности при данной Q_p увеличивает q_{2+6} .

При пылевидном сжигании сланца-кукерсита критическая температура ниже 100°C , таким образом, увеличение влажности при данной Q_p всегда увеличивает q_{2+6} .

Вышеприведенный метод можно применить и для других видов топлива, если элементарный состав горючей массы рассматривать как постоянный.

Расчеты для торфа и подмосковного бурого угля показывают, что при уменьшении низшей (или располагаемой для сланца-кукерсита) теплотворной способности в пределах $1500 \dots 4000$ ккал/кг за счет влажности или золы, потери с продуктами сжигания увеличиваются обратно пропорционально величине $\sqrt{Q_p}$, как и при сланце-кукерсита.

ЛИТЕРАТУРА

1. Х. Т. Раудсепп, А. С. Фомина, Б. К. Торпан, Х. К. Норман. Технико-химическая характеристика кукерского сланца западного крыла Эстонского сланцевого бассейна. Тр. Таллинск. политехн. ин-та. Сер. А, № 57, 1954, Сб. статей по химии и технологии горючего сланца.

2. С. Я. Корницкий, С. В. Татищев, Методика нормирования расхода топлива для отопления котлов малой и средней производительности, оборудованных слоевыми толками. Госпланиздат, 1948.
3. А. М. Гурвич, О расчете продуктов полного сгорания. Изв. АН СССР, Отд. техн. наук, № 9, 1945.
4. М. Б. Равич, Упрощенная методика теплотехнических расчетов. Изд. АН СССР, 1958.
5. А. Н. Адрианов, Универсальная энтальпийная диаграмма для продуктов сгорания различных топлив. Теплоэнергетика, № 3, 1959.
6. Б. И. Логинов, Номограммы для определения потери тепла с уходящими газами. Электрические станции № 8, 1960.
7. Я. Л. Пеккер, Подсчет потери тепла с уходящими газами. Теплоэнергетика № 8, 1960.
8. Тепловой расчет котельных агрегатов (нормативный метод). Энергоиздат, 1957.

Институт энергетики
Академии наук Эстонской ССР

Поступила в редакцию
19. II 1962

PÕLEVKIVI KOOSTISE MÕJU PÕLEMISPRODUKTIDEGA KAASNEVATELE SOOJAKADUDELE

E. Landra

Resümee

Põlevkivi koostise mõju tundmine soojakadudele põlevkivi põletamisel võimaldab täpsemalt hinnata põlevkivi kaevandamise ja rikastamise meetodeid. Ligikaudsed valemid põlemisproduktidega kaasnevate soojakadude q_{2+6} arvutamiseks põlevkivi kütteväärtuse ja koostise järgi esitatakse tolmpõlemise jaoks valemis (19) ja kihispõlemise jaoks valemis (20).

Valemite kasutamisel esinev viga ei ületa 0,4% kütteväärtusest, kui viimane on 1500...4000 kcal/kg piirides. Sellise kütteväärtuse puhul on kaod q_{2+6} esimeses lähenduses pöördvõrdelised ruutjuurega kütteväärtusest.

Eesti NSV Teaduste Akadeemia
Energeetika Instituut

Saabus toimetusse
19. II 1962

THE INFLUENCE OF THE COMPOSITION OF OIL SHALE ON HEAT LOSS WITH PRODUCTS OF COMBUSTION

E. Landra

Summary

For estimating the methods of oil shale mining and dressing, it is necessary to know the influence of the composition of oil shale on heat loss by combustion. The author presents approximate formulas for heat loss with products of oil shale. The heat loss in these formulas depends on the calorific value and composition of oil shale. Formula (19) presents the heat loss for the combustion of pulverized oil shale, formula (20) — for layer-wise combustion.

If the calorific value does not diminish below 1500 kcal/kg, or exceed 4000 kcal/kg, the error in these formulas is less than 0.4 per cent of the calorific value. With such calorific value, the mentioned heat loss is approximately inversely proportional to the square root of calorific value.

Academy of Sciences of the Estonian S.S.R.,
Institute of Energetics

Received
Feb. 19th, 1962