

А. МАРТИНС

ТЕЧЕНИЕ ЖИДКОГО ШЛАКА ЭСТОНСКОГО СЛАНЦА НА ОХЛАЖДАЕМЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ

При оценке нормальной работы топок с жидким шлакоудалением и определении подходящего способа сжигания топлива в топках этого типа широко используются вязкостные характеристики шлаков [1-7]. В настоящей работе при исследовании условий сжигания эстонского сланца-кукерсита в топках с жидким шлакоудалением также исходили из характеристик вязкости жидких шлаков сланца различного химического состава.

Вязкостные характеристики жидких шлаков эстонского сланца

На рис. 1 приведены вязкостные характеристики шлаков эстонского сланца различного химического состава по данным ОРГРЭС [7]. Значения содержания CaO в шлаках в соответствии с обозначениями характеристик вязкости следующие (в %): 1 — 40,16; 2 — 42,27; 3 — 43,90; 4 — 46,10; 5 — 48,14; 6 — 58,78; 7 — 60,89; 8 — 62,29; 9 — 63,02 и 10 — 63,62.

Для теоретического исследования работы топок с жидким шлакоудалением необходимо, чтобы характеристики вязкости шлаков были выражены в форме некоторой математической зависимости.

В нескольких ранее опубликованных работах (напр. [1, 2]) зависимость вязкости от температуры выражена при помощи трудно находимых констант. Характеристики вязкости, найденные по соответствующим константам, отличаются от характеристик, определенных экспериментально, больше всего в пределах малой вязкости ($\eta < 50$ нз) [1]. В других работах [3-5] используются математические формулы, описывающие характеристики вязкости до точек их разветвления, т. е. до температуры перехода шлака из жидкого состояния в пластическое (t_0). Все эти зависимости можно использовать в случае шлаков, точки разветвления характеристик которых лежат в пределах вязкости, превышающей 50 нз. Характеристики вязкости сланцевых шлаков разветвляются в пределах очень малых вязкостей ($\eta \approx 10$ нз; см. рис. 1), и использование вышеупомянутых зависимостей в расчетных схемах привело к появлению значительных ошибок.

Исходя из этого, при математическом описании характеристик вязкости жидкого сланцевого шлака, определенных экспериментально, за условные параметры приняты координаты соответствующей точки характеристики вязкости (η_d ; t_d), в которой при повышении температуры на 1 град вязкость шлака уменьшается на 1 нз. Эта точка в даль-

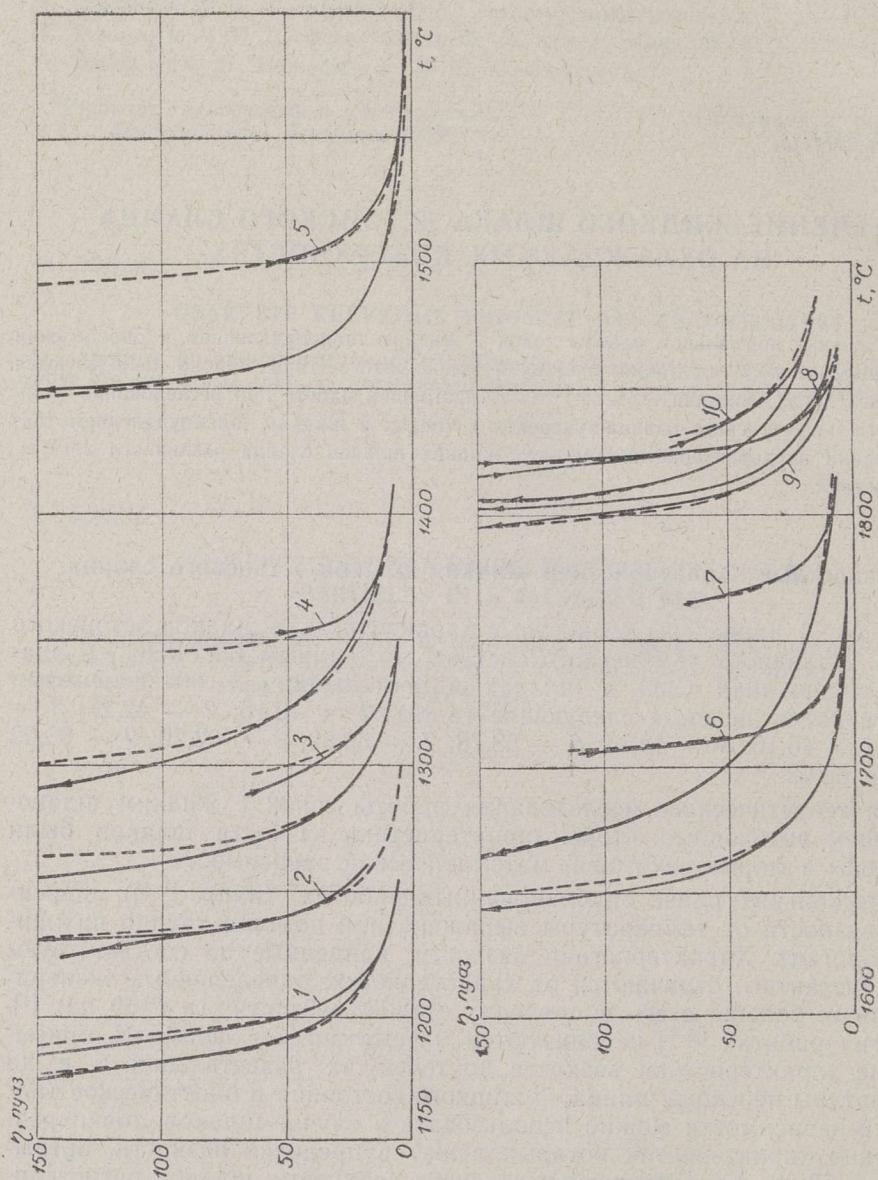


Рис. 1. Вязкостные характеристики жидких шлаков эстонского сланца.

нейшем условно называется поворотной точкой характеристики вязкости.

Характеристики вязкостей шлаков эстонских сланцев, определенных экспериментально, в пределах малых вязкостей достаточно хорошо описываются следующей эмпирической формулой:

$$\eta = \eta_A \left(\frac{t_A - t'}{t - t'} \right)^n, \quad (1)$$

где η — вязкость шлака, пз ;

η_A — вязкость шлака в поворотной точке характеристики вязкости, пз ;

t_A — температура шлака в поворотной точке характеристики вязкости, $^{\circ}\text{C}$;

t' — температура шлака при бесконечно большой вязкости, $^{\circ}\text{C}$;

t — температура шлака, $^{\circ}\text{C}$;

n — показатель степени.

Формула (1) представляет собой эмпирическую зависимость между температурой и вязкостью. Аналогичная связь уже была использована в ранее опубликованной работе [6].

На рис. 1 нанесены экспериментально определенные характеристики вязкости (сплошной линией) и характеристики, вычисленные по формуле (1) (пунктирной линией). При конструировании эмпирических характеристик вязкостей в качестве показателей степени выбирали целые числа, чтобы облегчить дальнейшие расчеты течения жидкого шлака. Для шлаков, содержащих 40—48% CaO , можно с достаточной точностью считать, что $n=2$ и для шлаков, содержащих 61—64% CaO , — $n=1$. Температурные константы эмпирических характеристик вязкости t_A и t' (относящиеся к экспериментальным характеристикам вязкости, определенным при разогреве шлака) внесены в полулогарифмические координаты температура — содержание CaO в процентах (рис. 2).

Как видно из рисунка, на участке с содержанием 48—58% CaO данные о вязкостных характеристиках отсутствуют. На этом участке пунк-

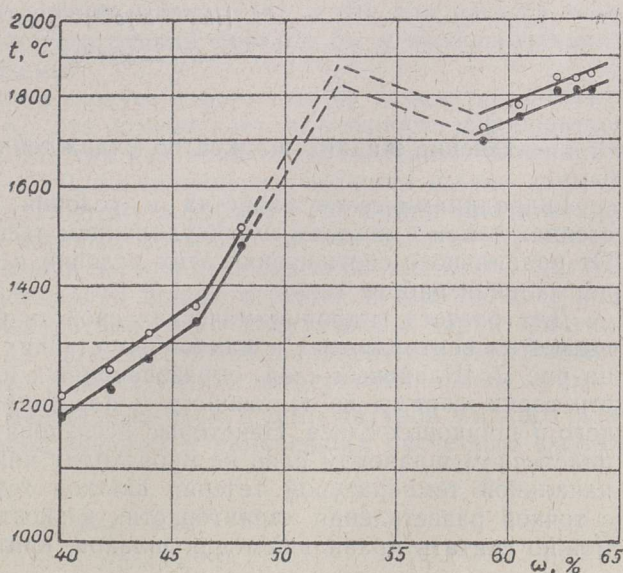


Рис. 2. Характерные константы эмпирических характеристик вязкости шлаков эстонского сланца t_A и t' в зависимости от содержания CaO в шлаке.

тиром нанесен (исходя из данных И. Эпика [8] о температурных характеристиках плавления золы эстонских сланцев и М. Кийлер [9] о температурах кристаллизации сланцезольных расплавов) предполагаемый характер изменения констант расчетных характеристик вязкостей сланцевых шлаков. На участках, где соответствующие данные имеются, характеристики температурных констант образуют приблизительно прямые и параллельные отрезки. Благодаря этому на этих участках температурные константы расчетных характеристик вязкостей сланцевых шлаков можно приближенно вычислить (в зависимости от содержания в шлаке СаО) по простым формулам

$$\begin{aligned} t_A &= b_A e^{a\omega} \\ t' &= b' e^{a\omega}, \end{aligned} \quad (2)$$

где ω — содержание СаО в шлаке, %;
 a , b_A и b' — константы.

Значения констант в формуле (2) приведены в табл. 1.

Таблица 1

Содержание СаО в шлаке, %	Константы		
	b_A	b'	a
40—46	543	528	0,020
46—48	107	104	0,055
48—58	Данные отсутствуют		
58—64	916	905	0,011

На основе формул (1) и (2) находим для шлаков эстонского сланца общую эмпирическую зависимость между вязкостью и температурой в зависимости от химического состава шлаков:

$$\eta = \frac{[(b_A - b')e^{a\omega}]^{n+1}}{n(t - b'e^{a\omega})^n} \quad (3)$$

Течение жидких шлаков по охлажденным поверхностям

Гидродинамические свойства и условия теплообмена шлаков на стенках топков с жидким шлакоудалением тесно связаны между собою. От правильного соотношения этих условий в большой степени зависит нормальная работа топков.

Для расчета гидродинамических свойств и толщины слоя жидкого шлака на вертикальных и наклонных стенках топки приведена схема на рис. 3. Шлаковый слой, образовавшийся на охлажденной поверхности топки, состоит из застывшего 1, пластичного 2 и совершенно жидкого 3 шлаковых слоев. Некоторые исследователи предполагают, что в пластичном шлаковом слое не происходит никакого течения и считают начальной температурой течения шлаков температуру, совпадающую с точкой разветвления характеристик вязкости [4]. Это предположение можно считать правильным для шлаков, критические температуры ко-

торых находятся на участке больших вязкостей ($\eta > 200$ пз). Для шлаков эстонского сланца это утверждение нельзя считать вполне правильным, ибо, как следует из рис. 1, характеристики вязкости их шлаков разветвляются в пределах малых вязкостей (~ 10 пз). Следовательно, при расчетах течения шлаков эстонского сланца придется учитывать известное течение шлака и в пластичном слое.

Жидкие шлаки, не содержащие или содержащие незначительное количество нерастворимых кристаллов, можно принимать за ньютоновские жидкости. При их ламинарном течении сила внутреннего трения выражается по закону Ньютона:

$$s = \eta_k \frac{dw_x}{dy}, \quad (4)$$

где

s — сила внутреннего трения, кг/м²;

η_k — коэффициент вязкости шлака, кг·сек/м² (1 пз $\approx 0,01$ кг·сек/м²);

w_x — скорость течения шлака, м/сек.

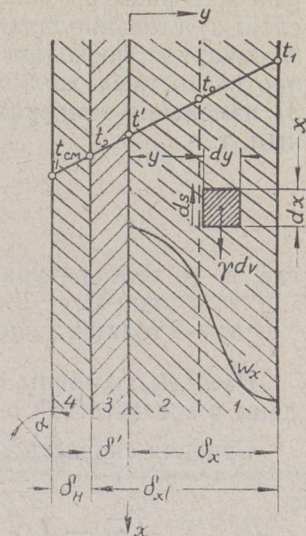


Рис. 3. Пояснительный рисунок к расчету.

Для пластичных шлаков, содержащих небольшое количество кристаллов и принимающих еще участие в текучести, формулу (4) применить нельзя. В этом случае сила внутреннего трения вычисляется по формуле [10]

$$s = k \left(\frac{dw_x}{dy} \right)^m, \quad (5)$$

где k и m — константы ($m < 1$), зависящие от консистенции жидкости (здесь m характеризует степень неньютоновского поведения жидкости).

В случае ньютоновской жидкости $m = 1$ и $k = \eta_k$.

Одновременное использование формул (4) и (5) для расчета течения жидких шлаков эстонского сланца привело бы к необоснованному усложнению расчетной схемы.

Для упрощения расчетов следует в формуле (5) заменить константу k кажущейся вязкостью η_a . Эта замена дает возможность освободиться от показателя степени m . Но так как показатель степени m изменяется в пластичной части от 1 до 0, то кажущуюся вязкость шлака прямым путем найти очень трудно. Поэтому в формулу (3) нужно ввести поправочный коэффициент p , который позволит рассматривать пластичный шлак в малых пределах вязкостей как ньютоновскую жидкость. Так как граница температуры застывания шлака остается неизменной, то константу температуры b_A поворотной точки эмпирической характеристики вязкости надо умножить на соответствующий поправочный коэффициент. Поправочный коэффициент p определяется экспериментальным путем.

Окончательная связь между вязкостью и температурой жидкого шлака эстонских сланцев, используемая в дальнейших расчетных схемах, имеет следующий вид:

$$\eta = \frac{[(pb_A - b')e^{a\omega}]^{n+1}}{n(t - b'e^{a\omega})^n} \quad (6)$$

При составлении расчетной схемы течения жидких шлаков предполагаем, что: 1) шлаковый слой на стенках топки можно рассматривать как равномерный и в отношении толщины одномерный, так как геометрические размеры топок во много раз превышают толщину шлакового слоя; 2) стекание шлакового слоя по стенкам топки рассматриваем как ламинарное, поскольку стекание шлака очень слабое — $Re < 0,03$ (течение вязкостных жидкостей является ламинарным до $Re = 20 \div 30$ [4]); 3) изменение температуры по всему шлаковому слою считаем линейным, т. е.

$$t = \frac{t_1 - t'}{\delta_x} y + t', \quad (7)$$

где t_1 — температура поверхности шлакового слоя со стороны пламени, °C;

δ_x — толщина слоя жидкого шлака, м.

Расчеты толщины слоя жидкого шлака и скорости стекания проведены в соответствии с ранее описанной расчетной схемой [6].

Средняя скорость стекания шлака в сечении x

$$\bar{w}_x = \sqrt[3]{\frac{200 G_s^2 \xi n (t_1 - b'e^{aw})^n x^2}{\gamma [(pb_A - b')e^{aw}]^{n+1} (n+1)(n+2)(n+3)}}, \quad (8)$$

где G_s — интенсивность сепарирования шлака из топочных газов, кг/м² сек; $G_s = f(x)$;

ξ — коэффициент наклона стены; $\xi = \sin \alpha$;

γ — удельный вес шлака, кг/м³;

x — координата, м.

Толщина текучего слоя шлака в сечении x

$$\bar{\delta}_x = \sqrt[3]{\frac{G_s [(pb_A - b')e^{aw}]^{n+1} (n+1)(n+2)(n+3)}{200 \xi \gamma^2 n (t_1 - b'e^{aw})^n}} x. \quad (9)$$

Вся толщина слоя шлака (текучего и застывшего) выражается формулой

$$\delta_{xl} = \delta_x \left[\frac{\lambda'_x (t' - t_2)}{\lambda_x (t_1 - t')} + 1 \right], \quad (10)$$

где λ'_x — средний коэффициент теплопроводности застывшего слоя шлака, ккал/м · ч · град;

t_2 — температура застывшего слоя шлака со стороны стенки топки, °C.

С целью сравнения на рис. 4 в координатах η , $t - t'$ изображены характеристики вязкости, полученные экспериментальным путем при плавлении сланцевых шлаков со средним содержанием CaO ($CaO \approx 40 \div 48\%$), и характеристики, рассчитанные по формуле (3).

Из рисунка видно, что на рассматриваемом участке характеристики вязкости, определенные экспериментально при плавлении шлака, очень хорошо совпадают и что все они могут быть заменены одной расчетной

характеристикой вязкости (кривая 1). Следовательно, можно предполагать, что для приведенного участка действителен с достаточной точностью какой-то поправочный коэффициент p , входящий в формулу (6).

Экспериментальное исследование течения сланцевых шлаков на охлаждаемых поверхностях показало, что значение поправочного коэффициента p равняется в среднем 1,013, в случае, если содержание CaO в шлаке составляет 40—43%. Если численное значение поправочного коэффициента p ввести в формулу (6), то можно рассчитать новые характеристики вязкости, которые в системе координат $\eta, t - t'$ образуют расчетную характеристику вязкости — кривую 2, заменяющую кривую 1 (рис. 4).

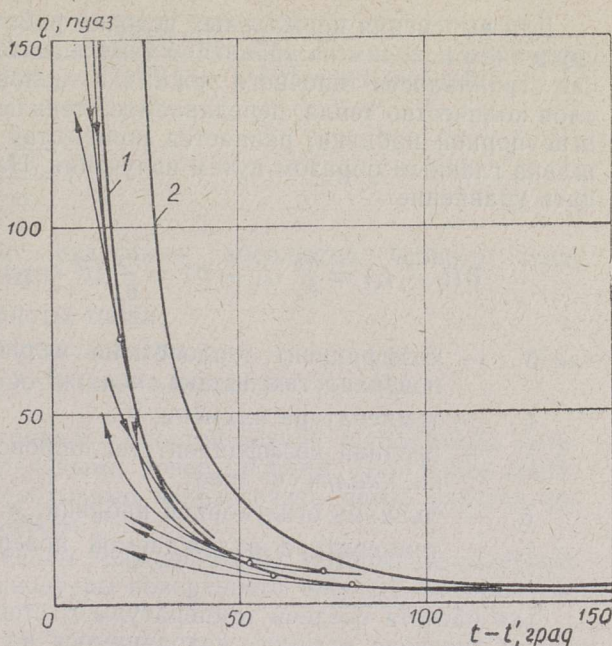


Рис. 4. Сравнение характеристик вязкости.

Термические условия, необходимые для течения слоя шлака

На основе соответствующих исследований рекомендуется в форсированных топках с жидким шлакоудалением использовать охлажденные поверхности топки, покрытые огнеупорной набивкой [11]. Рассмотрим подробнее условия теплообмена поверхностей топки такого типа. В данном случае с точки зрения стационарной работы топки необходимо, чтобы температура поверхности огнеупорной набивки со стороны топки (t_2) была ниже или в крайнем случае равна температуре затвердевания шлака (t'), т. е.

$$t' \geq t_2. \quad (11)$$

В противном случае произошло бы растворение огнеупорной набивки поверхностей топки в шлаковом слое.

С другой стороны невозможно, чтобы температура наружной поверхности текучего слоя шлака (t_1) была равна температуре застывания шлака (t'), так как тогда происходило бы непрерывное нарастание шлакового слоя. Нельзя рекомендовать также участок, где температура наружной поверхности слоя шлака мало отличалась бы от температуры застывания шлака, ибо уже небольшое колебание тепловой нагрузки топки может повести к увеличению слоя шлака. В случае сланцевых шлаков можно считать желательным, чтобы температура наружной поверхности шлака превышала температуру застывания на 15—25°:

$$t_1 \geq t' + (15 \div 25). \quad (11')$$

Для выяснения нормальных условий работы топок с жидким шлакоудалением исходим из уравнения теплового баланса таких топок. В случае стабильности топочного режима и теплового равновесия шлакового слоя количество тепла, передаваемое стенкам топки через слой шлака и огнеупорной набивки, равняется количеству тепла, полученному слоем шлака главным образом путем излучения. На основе этого можно написать уравнение:

$$\beta(t_f - t_1) = \frac{\lambda_x}{\delta_x}(t_1 - t') = \frac{\lambda'_x}{\delta_x}(t' - t_2) = \frac{\lambda_n}{\delta_n}(t_2 - t_{ст}), \quad (12)$$

где β — коэффициент теплообмена излучением между пламенем и поверхностью шлака, $\text{ккал/м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град}$;

t_f — температура пламени, $^{\circ}\text{C}$;

λ_n — средний коэффициент теплопроводности огнеупорной набивки, $\text{ккал/м} \cdot \text{ч} \cdot \text{град}$;

δ_n — толщина огнеупорной набивки, м ;

$t_{ст}$ — температура охлаждаемой поверхности, $^{\circ}\text{C}$.

Для расчета средней температуры t_1 стенок топки высотой H , определяем среднюю толщину находящегося на нем слоя текучего шлака:

$$\delta = \frac{1}{H} \int_0^H \delta_x dx = \frac{3}{4} \sqrt[3]{\frac{G_s [(pb_A - b')e^{aw}]^{n+1} (n+1)(n+2)(n+3)H}{200\xi\gamma^2 n(t_1 - b'e^{aw})^n}}. \quad (13)$$

На основе уравнения (12), формулы (13) и условий (11) и (11') после соответствующих преобразований получим формулу, которая с учетом условий теплообмена позволяет рассчитать температуру поверхностного слоя шлака:

$$t_1 \leq \left[\frac{3}{4} \frac{\lambda_n}{\lambda \delta_n} (b'e^{aw} - t_{ст}) \sqrt[3]{\frac{G_s [(pb_A - b')e^{aw}]^{n+1} (n+1)(n+2)(n+3)H}{200\xi\gamma^2 n}} \right]^{\frac{3}{n+3}} + b'e^{aw}, \quad (14)$$

где λ — средний коэффициент теплопроводности текучего слоя шлака через всю поверхность, высота которой равна H , $\text{ккал/м} \cdot \text{ч} \cdot \text{град}$.

По температуре поверхности шлакового слоя (t_1) можем, в свою очередь, найти температуру пламени в соответствующем поперечном сечении топки. При этом необходимо по температуре поверхности слоя шлака с известной приближенностью оценить соответствующие условия теплообмена излучением и конвекцией между пламенем и поверхностью шлака. Если при предварительном решении считать, что коэффициент конвективного теплообмена между поверхностью шлака и пламенем равен нулю, учитывая высокую температуру поверхности слоя шлака, то можно по закону Больцмана, на основе формулы (13) и уравнения (12) написать следующее новое уравнение:

$$C \left[\left(\frac{T_f}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_1}{100} \right)^4 \right] =$$

$$= \frac{4}{3} \lambda (t_1 - b'e^{a\omega}) \sqrt[3]{\frac{200\xi\gamma^2 n (t_1 - b'e^{a\omega})^n}{G_s [(pb_A - b')e^{a\omega}]^{n+1} (n+1)(n+2)(n+3)H}}, \quad (15)$$

где $C = C_0 a_\tau$; $a_\tau = \frac{1}{\frac{1}{a_f} + \frac{1}{a_{\text{шл}}} - 1}$;

$C_0 = 4,9$ — коэффициент излучения абсолютно черного тела, $\text{ккал/м}^2 \cdot \text{ч} \cdot ^\circ\text{K}^4$;

a_τ — степень черноты топки;

a_f — степень черноты пламени;

$a_{\text{шл}}$ — степень черноты шлака на стенках топки.

В данном случае рассматривался простой случай теплообмена излучением между двумя параллельными поверхностями. При более сложных случаях теплообмена необходимо использовать метод расчета зонального теплообмена излучением [12].

Объединяем все коэффициенты уравнения (15), которые не содержат температуры пламени и температуры поверхности текучего слоя шлака, в общее выражение:

$$K = \frac{4}{3} \frac{\lambda}{C} \sqrt[3]{\frac{200\xi\gamma^2 n}{G_s [(pb_A - b')e^{a\omega}]^{n+1} (n+1)(n+2)(n+3)H}} \cdot 10^8. \quad (16)$$

Уравнение (15) запишем теперь в следующем виде:

$$T_f^4 - T_1^4 = K (t_1 - b'e^{a\omega})^{\frac{3+n}{3}}. \quad (17)$$

Из уравнения (17) можно определить температуру пламени:

$$T_f = \sqrt[4]{T_1^4 + K (t_1 - b'e^{a\omega})^{\frac{3+n}{3}}}. \quad (18)$$

При помощи формулы (18) возможно по свойствам сланцевого шлака рассчитать необходимые термические условия в топках с жидким шлакоудалением.

Выводы

1. Характеристики вязкости сланцевых шлаков могут быть выражены степенной функцией. Для шлаков, содержащих 40—48% CaO , можно с достаточной точностью считать, что показатель степени $n = 2$.

2. Получена эмпирическая формула, по которой можно предварительно рассчитать приближенные характеристики вязкости шлаков эстонского сланца.

3. При помощи расчетных характеристик вязкости найдены уравнения, которые описывают явления течения шлаков эстонских сланцев на охлажденных стенках топки.

4. Разработан метод расчета, при помощи которого возможно по свойствам получаемого сланцевого шлака рассчитать необходимые термические условия в топках с жидким шлакоудалением.

ЛИТЕРАТУРА

1. Долежал Р., Топки с жидким шлакоудалением, М., 1959.
2. Reid W. T., Cohen P., Trans. ASME, No. 8, 66 (1944).
3. Дунский В. Д., Инженерно-физич. ж., № 9, 52—61 (1959).
4. Маршак Ю. Л., Теплоэнергетика, № 3, 16—22 (1961).
5. Бивницкий А. С., Тонконогий А. В., Изв. АН Каз. ССР. Сер. техн. и хим. наук, вып. 1, 107—115 (1963).
6. Мартинс А. А., Сб. Топливо и котельные установки, Таллин, 1964, стр. 59—71.
7. Лебедева М. Ф., Залкинд И. Я., Тагер С. А., Теплоэнергетика, № 8, 18—22 (1966).
8. Эпик И. П., Влияние минеральной части сланцев на условия работы котлоагрегата, Таллин, 1961.
9. Кийлер М. А., Сб. Исследования по строительству, НИИ строительства Госстроя ЭССР, Таллин, № 6, 1965, стр. 1—55.
10. Уилкинсон У. Л., Неньютоновские жидкости, М., 1964.
11. Руссо В. Л., Сб. Циклонные плавильные энерготехнологические процессы, М., 1963, стр. 75—83.
12. Суринов Ю. А., Изв. АН СССР. Отд. техн. наук, № 7, 992—1020 (1953).

*Институт термодинамики и электрофизики
Академии наук Эстонской ССР*

*Поступила в редакцию
15/IV 1966*

A. MARTINS

EESTI PÕLEVKIVI VEDELSLAKI VOOLAMINE JAHUTATUD PINDADEL

Eesti põlevkivi (kukersiidi) vedelslaki voolamise arvutamisel lähtutakse uurimuses põlevkivislakkide viskoossuse karakteristikutest. Esitatakse empiiriline valem, mille abil võib arvutuslikult leida erineva keemilise koosseisuga kukersiidi vedelslakkide viskoossuse karakteristikud. Empiiriliste viskoossuse karakteristikute alusel on leitud võrrandid, mis kirjeldavad kukersiidi vedelslakkide voolamisnähtusi jahutatud pindadel. Samuti on välja töötatud arvutusmeetod, mille abil võib kasutada põlevkivi slaki normaalsete voolamistingimuste alusel leida vajalikud termilised tingimused vastava põlevkivi põletamiseks vedelslakikoldes.

A. MARTINS

FLOW OF ESTONIAN OIL-SHALE LIQUID SLAG ALONG COOLED SURFACES

At a calculation of the flow of liquid slag derived from Estonian oil-shale (kukersite), account was taken of the viscosity characteristics of oil-shale slags. An empiric equation was derived with the help of which it is possible to compute the viscosity characteristics of Estonian oil-shale slags of different chemical compositions. On the basis of the empiric viscosity characteristics, equations have been found for describing the phenomena peculiar to the flow of Estonian oil-shale slags on cooled surfaces. Lastly, a computational method has been devised for finding the necessary thermal regime for burning oil shale in liquid slag furnaces, proceeding from normal flow conditions.