

**УДК 62-932.2**

**Нурматов Жахонгир Тогаймурадович**

**Каршинский инженерно-экономический институт**

**Карши, Узбекистан**

**ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РАБОТЫ ПЕЧИ ДЛЯ  
ПЛАВЛЕНИЯ БАЗАЛЬТА**

***Аннотация.* В статьи изложена основы расчёта теплового баланса и теоретические анализы процесса плавления базальта.**

***Ключевые слова.* Плавление, тепловой баланс, базальтовая крошка, экспериментальная печь, тепло**

***Nurmatov Jaxongir Togaymuradovich***

***Karshi engeneering economics institute***

***Karshi, Uzbekistan***

**THEORETICAL SUBSTANTIATION OF RATIONAL ENERGY  
PARAMETERS OF THE FURNACE OPERATION FOR BASALT  
MELTING**

***Annottion.*The article presents the basics of calculating the heat balance and theoretical analyses of the process of melting basalt..**

***Keywords.* Melting, heat balance, basalt chips, experimental furnace, heat**

Тепловой баланс может составляться для зоны технологического процесса, для рабочего пространства печи, для отдельных элементов печи, теплового оборудования и для всего печного агрегата в целом. По мнению ученых, результаты анализа теплового баланса в различных рассматриваемых случаях имеют разный подход [1, 2 - 5].

Выполненное нами экспериментальное исследование по плавлению базальтового камня подтвердило вышеуказанное. Проведению данной работы способствовало отсутствие в технической литературе сведений о состоянии внутри печи в процессе плавления базальта и диабаза с помощью природного газа по предложенной схеме, с учетом специфики базальтового минерала

Кызылкумских месторождений (см. рис.1 и 3). В данной главе приводятся результаты теоретического анализа теплового баланса, которые являются основой проведения экспериментальной части исследования.

Теоретический анализ проводился с учетом параметров печи, изготовленной из огнеупорного кирпича 2ХП-3 объемом 1  $m^3$ . Выбор 1  $m^3$  объема печи аргументировался тем, что по сведениям специалистов [4, 5] для плавления базальтовой магмы и получения волокон с использованием природного газа объем печи размером 1  $m^3$  является оптимальным для изучения технологического процесса плавления базальтового камня и наблюдения за происходящим.

В основу проводимого анализа теплового баланса была положена методика расчета Ю.П. Филимонова [2]. Наша экспериментальная печь, в отличие от случая, рассмотренного в [2], греется за счет газа, который подается в печь через горелки с четырех сторон печи, при давлении тёплого воздуха 150 – 200 kPa, что является в нашем случае достаточным для получения необходимой температуры 1300 -1750  $^{\circ}\text{C}$ .

Для теоретического анализа процесса получения базальтовых волокон в печи непрерывного действия плавлением базальтовой крошки примем следующие допущения и статьи теплового баланса (в единицу времени):

- пылевынос из печи равен нулю;
- коэффициент избытка воздуха на сжигание природного газа –  $a$ ;
- подсосов воздуха в печь не происходит и  $a$  определяется только подачей воздуха вентилятором через горелки;
- сгорание природного газа происходит мгновенно и в выходном сечении горелок устанавливается теоретическая температура горения;
- потеря тепла вследствие химического недожога газа нет;
- расход тепла, связанный с реакциями диссоциации продуктов сгорания топлива, равен нулю;
- хотя при нагреве и плавлении базальта происходят экзотермические и экзотермические реакции (диссоциация соединений и окислительные про-

цессы), масса получающихся волокон равна массе загружаемой базальтовой сухой крошки.

1. *Приход тепла:*

а) физическое тепло природного газа:

$$Q_{\text{пг}} = c_{\text{пг}} t_{\text{пг}} B, \quad (1)$$

где  $c_{\text{пг}}$  – теплоемкость,  $t_{\text{пг}}$  – температура,  $B$  – расход природного газа, подаваемого в печь на нагрев и плавление базальта;

б) тепло сгорания природного газа:

$$Q_g = Q_h^c B, \quad (2)$$

где  $Q_h^c$  - теплота сгорания (низшая) сухого газа;

в) физическое тепло воздуха:

$$Q_v = c_v t_v V^0 a B, \quad (3)$$

где  $c_v$  – теплоёмкость и  $t_v$  - температура воздуха,  $V^0$  – теоретическое количество воздуха на сжигание 1  $m^3$  (или 1 kg) природного газа,  $a$  – коэффициент избытка воздуха;

г) физическое тепло сухого базальтового камня:

$$Q_{Б\text{сух}} = C_{Б\text{сух}} t_{Б\text{сух}} G_{Б\text{сух}}, \quad (4)$$

где  $C_{Б\text{сух}}$  – теплоёмкость,  $t_{Б\text{сух}}$  – температура и  $G_{Б\text{сух}}$  - расход подаваемого в печь базальтового камня в расчёте на сухой вес;

д) тепло, вносимое влагой базальтового камня:

$$Q_{вл} = G_{Б\text{сух}} w t_{Б\text{сух}}, \quad (5)$$

где  $w$  - влажность базальтового камня;

е) тепло экзотермических реакций при нагреве базальта:

$$\sum Q_{экз.р} = G_{Б\text{сух}} \sum q_{экз.р} i; \quad (6)$$

где  $q_{экз.р} i$  - удельная теплота  $i$ -ой экзотермической реакции, относённая к единице массы базальтовой крошки.

Сумма приходных частей теплового баланса:

$$\Sigma Q_{\text{прих}} = Q_{\text{пг}} + Q_g + Q_v + Q_{Б\text{сух}} + Q_{вл} + \sum Q_{экз.р} i, \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \text{или } \Sigma Q_{\text{прих}} = & c_{\text{пг}} t_{\text{пг}} B + Q_h^c B + c_v t_v V^0 a B + C_{Б\text{сух}} t_{Б\text{сух}} G_{Б\text{сух}} + \\ & + G_{Б\text{сух}} w t_{Б\text{сух}} + G_{Б\text{сух}} \sum q_{экз.р} i, \end{aligned} \quad (8)$$

$$\text{или } \Sigma Q_{\text{прих}} = B (c_{\text{пг}} t_{\text{пг}} + Q_{\text{н}}^c + c_{\text{в}} t_{\text{в}} V^0 a) + \\ + G_{\text{Б сух}} (C_{\text{Б сух}} t_{\text{Б сух}} + w t_{\text{Б сух}} + \sum q_{\text{экз. ри}}) \quad (9)$$

2. Расход тепла:

- а) тепло водяных паров образовавшихся при испарении и нагреве влаги, внесённой в печь с базальтом:

$$Q_{\text{исп}} = G_{\text{Б сух}} w I_{\text{пв тг}}, \quad (10)$$

где  $I_{\text{пв тг}}$  – энталпия (теплосодержание) паров воды при температуре технологических газов на выходе из печи;

- б) тепло эндотермических реакций при нагреве базальта:

$$\Sigma Q_{\text{энд. ри}} = G_{\text{Б сух}} \Sigma q_{\text{энд. ри}}; \quad (11)$$

где  $q_{\text{энд. ри}}$  – удельная теплота  $i$ -ой эндотермической реакции, отнесённая к единице массы базальтовой крошки;

- в) тепло плавления базальтовой крошки:

$$Q_{\text{пл}} = G_{\text{Б сух}} q_{\text{пл}}, \quad (12)$$

где  $q_{\text{пл}}$  – удельная теплота плавления базальта;

- г) тепло базальтовых волокон на выходе из печи:

$$Q_{\text{б вол}} = G_{\text{Б сух}} C_{\text{Б сух}} t_{\text{вых}}, \quad (13)$$

где  $C_{\text{Б сух}}$  - теплоёмкость базальта при температуре плавления  $t_{\text{вых}}$ ;

- д) тепло отходящих технологических газов при температуре  $t_g$ :

$$Q_g = (V_{CO_2} C_{CO_2} + V_{H_2O} C_{H_2O} + V_{N_2} C_{N_2} + V_{O_2} C_{O_2}) \times t_g \quad (14)$$

где  $V_i$  и  $C_i$ , соответственно, объём и объёмная теплоёмкость  $i$ -й составляющей продуктов сгорания газа в печи.

По данным [4] при  $a = 1,25$  полный удельный объём продуктов сгорания природного газа, близкого по составу газу Газлинского месторождения равен  $V_g = 13,51 \text{ м}^3/\text{м}^3$ . Теплоёмкость продуктов сгорания при  $1500 - 1700 {}^\circ\text{C}$  близка теплоёмкости воздуха и в среднем составляет  $C^{t_g}_{\text{возд}} = 1,47 \text{ кДж} / (\text{м}^3 \text{ } {}^\circ\text{C})$ . Для анализа примем:

$$Q_g = BV_g C^{t_g}_{\text{возд}} t_g = 20 t_g B; \quad (15)$$

е) потери тепла во внешнюю среду зависят от конструкции и надёжности теплоизоляции печи и меняются от 8 до 22% от общего количества расходуемого тепла; обозначим эту часть потерь  $d$ :

$$Q_{\text{пот}} = d \sum Q_{\text{расх}} \quad (16)$$

Сумма расходных частей теплового баланса:

$$\sum Q_{\text{расх}} = Q_{\text{исп}} + \sum Q_{\text{энд. р i}} + Q_{\text{пл}} + Q_{\text{б вол}} + Q_{\text{г}} + Q_{\text{пот}}, \quad (17)$$

или  $\sum Q_{\text{расх}} = G_{\text{Б сух}} w I_{\text{пв т г}} + G_{\text{Б сух}} \sum q_{\text{энд. р i}} + G_{\text{Б сух}} q_{\text{пл}} + G_{\text{Б сух}} C_{\text{Б сух}} t_{\text{вых}} + B V_g C^{t_g}_{\text{возд}} t_g + d \sum Q_{\text{расх}}, \quad (18)$

или  $\sum Q_{\text{расх}} = (1-d)^{-1} [B V_g C^{t_g}_{\text{возд}} t_g + G_{\text{Б сух}} (w I_{\text{пв т г}} + q_{\text{пл}} + C_{\text{Б сух}} t_{\text{вых}} + \sum q_{\text{энд. р i}})], \quad (19)$

2. Уравнение теплового баланса процесса получения базальтовых волокон:

$$\sum Q_{\text{прих}} = \sum Q_{\text{расх}} \quad (20)$$

или  $B(c_{\text{пг}} t_{\text{пг}} + Q_{\text{h}}^c + c_{\text{в}} t_{\text{в}} V^0 a) + G_{\text{Б сух}} (C_{\text{Б сух}} t_{\text{Б сух}} + w t_{\text{Б сух}} + \sum q_{\text{экз. р i}}) = (1-d)^{-1} [B V_g C^{t_g}_{\text{возд}} t_g + G_{\text{Б сух}} (w I_{\text{пв т г}} + q_{\text{пл}} + C_{\text{Б сух}} t_{\text{вых}} + \sum q_{\text{энд. р i}})], \quad (21)$

откуда

$$B = G_{\text{Б сух}} [(1-d)^{-1} \Psi_1 - \Psi_2] / [\Psi_3 - (1-d)^{-1} V_g C^{t_g}_{\text{возд}} t_g] \quad (22)$$

или  $b = B/G_{\text{Б сух}} = [(1-d)^{-1} \Psi_1 - \Psi_2] / [\Psi_3 - (1-d)^{-1} V_g C^{t_g}_{\text{возд}} t_g], \quad (23)$

где  $b$  - удельный расход природного газа на плавление базальта и

$$\Psi_1 = w I_{\text{пв т г}} + C_{\text{Б сух}} t_{\text{вых}} + q_{\text{пл}} + \sum q_{\text{энд. р i}}, \quad (24)$$

$$\Psi_2 = C_{\text{Б сух}} t_{\text{Б сух}} + w t_{\text{Б сух}} + \sum q_{\text{экз. р i}}, \quad (25)$$

$$\Psi_3 = c_{\text{пг}} t_{\text{пг}} + Q_{\text{h}}^c + c_{\text{в}} t_{\text{в}} V^0 a. \quad (26)$$

Анализ работы печи упростим, приняв адиабатическую модель печи, когда потери через теплоизоляцию равны нулю или  $d = 0$ , а также положив, в первом приближении, удельные тепловые эффекты эндотермических и экзотермических реакций при нагреве базальта равными между собой.

Тогда  $(1-d)^{-1} = 1$  и

$$b = [\Psi_1 - \Psi_2] / [\Psi_3 - V_g C^{t_g}_{\text{возд}} t_g] \quad (27) \text{ или}$$

$$b = \frac{w(I_{n\theta_{t_e}} - t_{B_{c_{yx}}}) + C_{B_{c_{yx}}} (t_{вых} - t_{B_{c_{yx}}}) + q_{n,l}}{c_{n,e} t_{n,e} + Q_h^c + c_e t_e V^0 a - V_e C_{возд}^{t_e} t_e} \quad (28)$$

Пренебрегая из-за незначительности величинами  $t_B$  сух и  $c_{n,l}$  получим:

$$b = \frac{wI_{n\theta_{t_e}} + C_{B_{c_{yx}}} t_{вых} + q_{n,l}}{Q_h^c + c_e t_e V^0 a - V_e C_{возд}^{t_e} t_e} \quad (29)$$

Для сухого базальта  $w = 0$  и тогда:

$$b = \frac{C_{B_{c_{yx}}} t_{вых} + q_{n,l}}{Q_h^c - (V_e C_{возд}^{t_e} t_e - c_e t_e V^0 a)} \quad (30)$$

В выражении (4) числитель – энталпия жидкого базальта  $I_{Бж}$  (отнесённая к единице массы базальта), в знаменателе в скобках – разность энталпий отходящих технологических газов и воздуха, подаваемого в горелки (отнесены к единице объёма), следовательно,

$$b = I_{Бж} / [Q_h^c - (I_g - I_b)], \quad (31)$$

или: удельный расход природного газа на плавление базальта в адиабатической печи непрерывного действия примерно равен отношению энталпии получаемого жидкого базальта к разности  $Q_h^c$  этого газа и величины  $(I_g - I_b)$ , определяющей превышение энталпии выбросных технологических газов над энталпией воздуха, подаваемого на сжигание природного газа.

Из (4) следует, что снижение расхода природного газа на плавление базальта может быть достигнуто использованием газа с высокой калорийностью  $Q_h^c$ , применением базальтов с максимальным содержанием легкоплавких составляющих, то есть с низким  $q_{пл}$ , и увеличением энталпии воздуха  $I_b$  его нагревом, например в рекуператоре тепла отходящих газов.

Для условий:  $C_{B_{сух}} = 1,09 \text{ kDj / (kg } ^0\text{C)}$  (табл. 2),  $t_{вых} = 1675 \text{ } ^0\text{C}$ ,  $q_{пл} = 142 \text{ kDj / kg}$ ,  $Q_h^c = 37100 \text{ kDj / nm}^3$ ,  $I_g = V_g C_{возд}^{t_g} t_g = 20 t_g$  (см. п.2 д) и  $t_g = 1600 \text{ } ^0\text{C}$  при  $t_b = 20 \text{ } ^0\text{C}$  из (4) получим, что минимально необходимый удельный расход природного газа для плавления базальта в адиаба-

тической печи непрерывного действия при отсутствии утилизации тепла выбросных газов равен

$$b = 0,386 \text{ nm}^3 / \text{kg}.$$

Минимально возможный (для печи и рекуператора без тепловых потерь) удельный расход природного газа при другом крайнем условии, когда  $t_r = t_b = 1600^{\circ}\text{C}$  для вышеприведенных данных будет равен:

$$b_{\min} = (C_B \text{ сух}t_{\text{вых}} + q_{\text{пл}}) / [Q_h^c - t_r C_{\text{возд}}^{t_r} (V_r - V^0 a)] = 0,058 \text{ nm}^3/\text{kg}.$$

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Нурматов Жахонгир Тогаймурадович, Курбанов Абдирахим Ахмедович, Кобилов Сарвар Сирож Угли, Жумаев Жасурбек Рустам Угли ТЕПЛОВАЯ ОБРАБОТКА И ИЗМЕНЕНИЕ СООТВЕТСТВУЮЩИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ БАЗАЛЬТОВ // Universum: технические науки. 2021. №12-5 (93). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/teplovaya-obrabortka-i-izmenenie-sootvetstvuyuschih-pokazateley-bazaltov> (дата обращения: 04.11.2022).

2. Раширова Р.К., Ахмедович К.А., Алиев Т., Джиянов А.Б., Турдиева О.Дж. и Нурматов Д.Т. (2020). Термическая обработка и изменение собственных показателей базальтов. *Землеведение*, 2 (2), с1-с1.

3. Нурматов Дж. Т., Курбанов А. А. и Раширова Р. К. (2019). Сравнительный анализ физико-химических свойств базальтов Узбекистана и пути решения проблем выбора направлений переработки сырья. *Землеведение*, 1 (1), стр. 59-59 .

4. Курбанов, А. А., Нурматов, Ж. Т., Раширова, Р. К., Умрзакова, Ш. У., & Абдуллаева, А. О. (2019). ФОРМИРОВАНИЯ ЖИДКОГО БАЗАЛЬТА И ЕГО СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ. Международный академический вестник, (5), 123-125.

5. Курбанов, А. А., Нурматов, Ж. Т., Халилова, Ш. И., Раширова, Р. К., & Абдуллаева, А. О. (2019). ПРОЦЕСС ОЧИСТКИ МИНЕРАЛЬНЫХ ПОРОД ОТ ПРИМЕСЕЙ. Международный академический вестник, (5), 125-127.