

*Нурматов Жахонгир Тогаймурадович*  
*Каршинский инженерно-экономический институт*  
*Карши, Узбекистан*

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

*Аннотация.* В статье изложена основы расчёта теплового баланса и теоритические 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 диабазы 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  $1 \text{ м}^3$ . Выбор  $1 \text{ м}^3$  объема печи аргументировался тем, что по сведениям специалистов [4, 5] для плавления базальтовой магмы и получения волокон с использованием природного газа объем печи размером  $1 \text{ м}^3$  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  $150 - 200 \text{ кПа}$ , что является в нашем случае достаточным для получения необходимой температуры  $1300 - 1750 \text{ }^\circ\text{C}$ .

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;
- потерь 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:

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

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

б) тепло сгорания природного газа:

$$Q_{\text{г}} = Q_{\text{н}}^{\text{с}} B, \quad (2)$$

где  $Q_{\text{н}}^{\text{с}}$  – теплота сгорания (низшая) сухого газа;

в) физическое тепло воздуха:

$$Q_{\text{в}} = c_{\text{в}} t_{\text{в}} V^0 a B, \quad (3)$$

где  $c_{\text{в}}$  – теплоёмкость и  $t_{\text{в}}$  – температура воздуха,  $V^0$  – теоретическое количество воздуха на сжигание  $1 \text{ m}^3$  (или  $1 \text{ kg}$ ) природного газа,  $a$  – коэффициент избытка воздуха;

г) физическое тепло сухого базальтового камня:

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

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

д) тепло, вносимое влагой базальтового камня:

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

где  $w$  – влажность базальтового камня;

е) тепло экзотермических реакций при нагреве базальта:

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

где  $q_{\text{экз. р } i}$  – удельная теплота  $i$  – ой экзотермической реакции, отнесенная к единице массы базальтовой крошки.

Сумма приходных частей теплового баланса:

$$\Sigma Q_{\text{прих}} = Q_{\text{пр}} + Q_{\text{г}} + Q_{\text{в}} + Q_{\text{Б сух}} + Q_{\text{вл}} + \Sigma Q_{\text{экз. р } i}, \quad (7)$$

$$\text{или } \Sigma Q_{\text{прих}} = c_{\text{пр}} t_{\text{пр}} B + Q_{\text{н}}^{\text{с}} B + c_{\text{в}} t_{\text{в}} V^0 a B + C_{\text{Б сух}} t_{\text{Б сух}} G_{\text{Б сух}} + G_{\text{Б сух}} w t_{\text{Б сух}} + G_{\text{Б сух}} \Sigma q_{\text{экз. р } i}, \quad (8)$$

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

2. Расход тепла:

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

$$Q_{\text{исп}} = G_{\text{Б сых}} w I_{\text{пв т г}}, \quad (10)$$

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

б) тепло эндотермических реакций при нагреве базальта:

$$\Sigma Q_{\text{энд. р i}} = G_{\text{Б сых}} \Sigma q_{\text{энд. р i}}; \quad (11)$$

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

в) тепло плавления базальтовой крошки:

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

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

г) тепло базальтовых волокон на выходе из печи:

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

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

д) тепло отходящих технологических газов при температуре  $t_{\text{г}}$ :

$$Q_{\text{Г}} = (V_{\text{CO}_2} C_{\text{CO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} C_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{N}_2} C_{\text{N}_2} + V_{\text{O}_2} C_{\text{O}_2}) \times t_{\text{Г}} \quad (14)$$

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  $V_{\text{Г}} = 13,51 \text{ м}^3/\text{м}^3$ . Теплоёмкость продуктов сгорания при 1500 -1700 °С близка теплоёмкости воздуха и в среднем составляет  $C_{\text{тг}_{\text{возд}}} = 1,47 \text{ кДж} / (\text{м}^3 \text{ } ^\circ\text{С})$ . Для анализа примем:

$$Q_{\text{Г}} = B V_{\text{Г}} C_{\text{тг}_{\text{возд}}} t_{\text{Г}} = 20 t_{\text{Г}} B; \quad (15)$$

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:

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

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

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

2. Уравнение теплового баланса процесса получения базальтовых волокон:

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

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

откуда

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

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

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

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

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

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

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

$$b = [\Psi_1 - \Psi_2] / [\Psi_3 - V_{\text{г}} C^{\text{тг}}_{\text{возд}} t_{\text{г}}] \quad (27) \quad \text{или}$$

$$b = \frac{w(I_{n\epsilon_{tz}} - t_{B_{\text{сyx}}}) + C_{B_{\text{сyx}}} (t_{\text{вых}} - t_{B_{\text{сyx}}}) + q_{\text{пл}}}{c_{n_2} t_{n_2} + Q_n^c + c_{\epsilon} t_{\epsilon} V^0 a - V_2 C_{\text{возд}}^{t_2} t_2} \quad (28)$$

Пренебрегая из-за незначительности величинами  $t_{B_{\text{сyx}}}$  и  $C_{\text{пл}} t_{\text{пл}}$ , получим:

$$b = \frac{wI_{n\epsilon_{tz}} + C_{B_{\text{сyx}}} t_{\text{вых}} + q_{\text{пл}}}{Q_n^c + c_{\epsilon} t_{\epsilon} V^0 a - V_2 C_{\text{возд}}^{t_2} t_2} \quad (29)$$

Для сухого базальта  $w = 0$  и тогда:

$$b = \frac{C_{B_{\text{сyx}}} t_{\text{вых}} + q_{\text{пл}}}{Q_n^c - (V_2 C_{\text{возд}}^{t_2} t_2 - c_{\epsilon} t_{\epsilon} V^0 a)} \quad (30)$$

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

$$b = I_{\text{Бж}} / [Q_n^c - (I_{\text{г}} - I_{\text{в}})], \quad (31)$$

или: удельный расход природного газа на плавление базальта в адиабатической печи непрерывного действия примерно равен отношению энтальпии получаемого жидкого базальта к разности  $Q_n^c$  этого газа и величины  $(I_{\text{г}} - I_{\text{в}})$ , определяющей превышение энтальпии выбросных технологических газов над энтальпией 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  $Q_n^c$ , применением базальтов с максимальным содержанием легкоплавких составляющих, то есть с низким  $q_{\text{пл}}$ , и увеличением энтальпии воздуха  $I_{\text{в}}$  его нагревом, например в рекуператоре тепла отходящих газов.

Для условий:  $C_{B_{\text{сyx}}} = 1,09 \text{ kDj} / (\text{kg} \text{ } ^\circ\text{C})$  (табл. 2),  $t_{\text{вых}} = 1675 \text{ } ^\circ\text{C}$ ,  $q_{\text{пл}} = 142 \text{ kDj} / \text{kg}$ ,  $Q_n^c = 37100 \text{ kDj} / \text{nm}^3$ ,  $I_{\text{г}} = V_{\text{г}} C_{\text{г}}^{t_{\text{г}}} t_{\text{г}} = 20 t_{\text{г}}$  (см. п.2 д) и  $t_{\text{г}} = 1600 \text{ } ^\circ\text{C}$  при  $t_{\text{в}} = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$  из (4) получим, что минимально необходимый удельный расход природного газа для плавления базальта в адиабата-

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  $t_{\text{г}} = t_{\text{в}} = 1600 \text{ }^{\circ}\text{C}$  для вышеприведенных данных будет равен:

$$b_{\text{min}} = (C_{\text{Б сух}} t_{\text{вых}} + q_{\text{пл}}) / [Q_{\text{н}}^{\text{с}} - t_{\text{г}} C_{\text{г}}^{\text{т}}_{\text{возд}} (V_{\text{г}} - V^0 a)] = 0,058 \text{ nm}^3/\text{kg}.$$

## 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-obrabotka-i-izmenenie-sootvetstvuyuschih-pokazateley-bazaltov> (дата обращения: 04.11.2022).

2. Рашидова 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 Рашидова 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., Рашидова, 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., Рашидова, Р. К., & Абдуллаева, А. О. (2019). ПРОЦЕСС ОЧИСТКИ МИНЕРАЛЬНЫХ ПОРОД ОТ ПРИМЕСЕЙ. *Международный академический вестник*, (5), 125-127.