

Д. Т. Н. С. Я. Давыдов¹, Д. Т. Н. Н. П. Косарев¹, Д. Т. Н. Н. Г. Валиев¹,
К. Т. Н. Г. Н. Бездежский², Д. Т. Н. И. Д. Кашеев³, К. Т. Н. В. Н. Корюков³

¹ ФГБОУ ВПО «Уральский государственный горный университет»,
г. Екатеринбург, Россия

² ООО «ИнКом Энергоцветмет», г. Екатеринбург, Россия

³ ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет», г. Екатеринбург, Россия

УДК 662.614:669.712

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЛИНОЗЕМНОЙ ПЫЛИ ПЕЧЕЙ КАЛЬЦИНАЦИИ ГИДРОКСИДА АЛЮМИНИЯ

Показана возможность использования глиноземной пыли в технологии производства высококачественных огнеупорных изделий муллитокорундового и муллитового составов. Представлен расчет теплового баланса процесса кальцинации гидроксида алюминия в трубчатой вращающейся печи с выводом из оборота глиноземной пыли. Установлено, что при выводе глиноземной пыли электрофильтров из оборота расход топлива не увеличивается, однако при этом уменьшатся затраты электроэнергии на получение сжатого воздуха для транспортирования пыли.

Ключевые слова: глиноземная пыль, гидроксид алюминия, тепловой баланс, печь, пневмотранспорт.

В производстве глинозема заключительной операцией является кальцинация гидроксида алюминия, которая проводится с целью удаления влаги и получения безводного глинозема. Процесс осуществляют в печах различных конструкций: трубчатых вращающихся, «кипящего слоя» и циклонно-вихревых. При кальцинации гидроксида алюминия в печах образуется пыль. С отходящими газами пыль попадает в мультициклоны и электрофильтры, где улавливается и в настоящее время в основном возвращается в печь с исходным гидроксидом алюминия (см. рисунок, а).

С пылью в печь поступает некоторое количество тепла. Однако для возврата пыли расходуется дополнительно сжатый воздух, на нагрев которого затрачивается тепло. Кроме того, возвратная пыль в основном мелкодисперсный продукт и, следовательно, влияет на крупность товарного глинозема. В данной работе обоснована целесообразность вывода из технологической схемы части пыли из электрофильтров (см. рисунок, б).

В настоящее время на Богословском алюминиевом заводе (ОАО БАЗ – СУАЛ филиал ОАО СУАЛ) доля пыли электрофильтров в общей массе глинозема составляет от 7 до 14 %. В расчете принимаем, что эта доля составит 10 %. Исключение этой пыли из оборота позволит увеличить загрузку гидроксида алюминия примерно на 10 % и повысить производительность печей кальцинации [1–5].

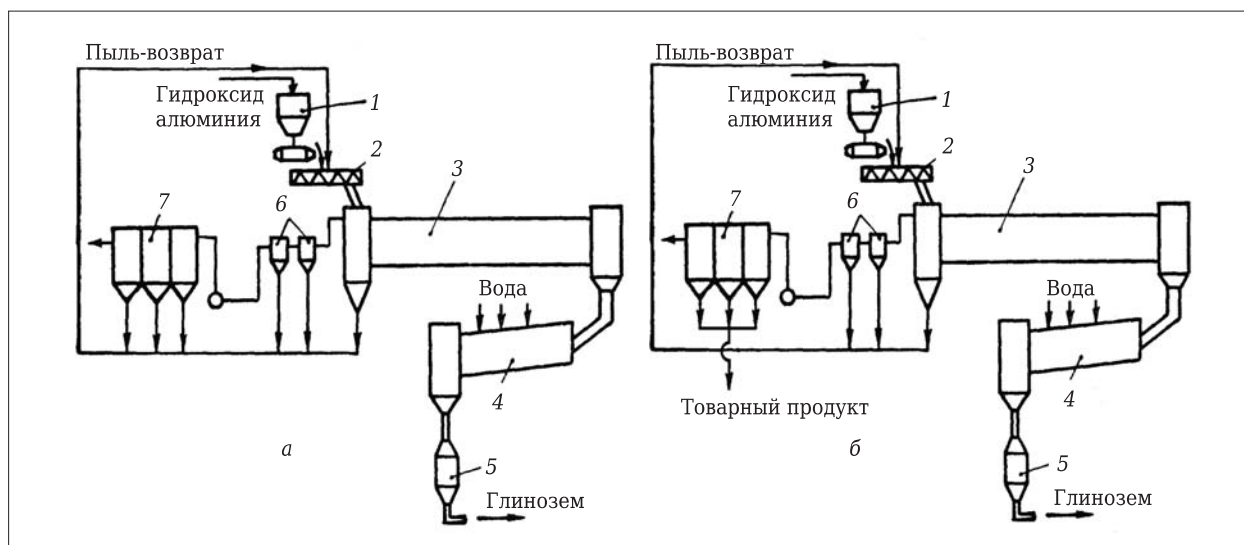
Исследования физико-химических и технологических свойств глиноземной пыли от электрофильтров цеха кальцинации Богословского алю-

миниевого завода и разработка технологии ее использования в цементной и огнеупорной промышленности выполнены ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет» и АО ОТ ВОСТИО [1, 6].

Гидроксид алюминия существует в природе в двух формах: тригидратоксида $\text{Al}(\text{OH})_3$ и моногидратоксида AlOOH . Каждая форма гидроксида алюминия имеет полиморфные кристаллические разновидности: тригидратоксид — гиббсит, байерит и нордстрандит, моногидратоксид — бёмит и диаспор.

При термическом разложении гидратоксидных форм глинозема за счет удаления гидроксильных групп и молекул воды в их кристаллических решетках появляются вакансии. В результате гидратации образуется материал, находящийся в «активном» состоянии и обладающий значительным запасом избыточной энергии. Залечивание вакансий в кристаллической решетке сопровождается фазовыми превращениями с перестройкой дефектной решетки, диффузией катиона алюминия и образованием более стабильных тетраэдрических или октаэдрических структур. Считают, что модификации оксида алюминия, образующиеся при термическом разложении гидроксидов алюминия, являются дискретными полиморфными фазами.

Рентгенофазовый анализ пробы пыли от электрофильтров ОАО БАЗ – СУАЛ показал, что она содержит большое количество $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ и незначительное количество $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ и бёмита. Зерновой состав пыли представлен фракцией мельче 64 мкм, в том числе содержание фракции мельче 16 мкм



Аппаратурно-технологическая схема процесса кальцинации гидроксида алюминия по вариантам а и б: 1 — бункер; 2 — смесительный шнек; 3 — вращающаяся печь; 4 — холодильник; 5 — камерный насос; 6 — мультициклоны; 7 — электрофилтры

составляет почти 90 %. Зерновой состав высокоглиноземистого материала представлен ниже:

Размер частиц, мкм, менее . . .	1,0	1,5	2,0	3,0
Содержание, мас. %	6,8	8,2	10,8	14,0

α - Al_2O_3 и тонком помоле обожженного глинозема до фракции 60 мкм.

4,0	6,0	8,0	12,0	16,0	24,0	32,0	40,0	48,0	64,0
23,2	48,3	67,5	85,2	88,2	91,2	93,7	94,1	99,5	100,0

Замена технического глинозема на глиноземную пыль в технологии производства высококачественных глиноземистых цементов Талюм и особочистого высокоглиноземистого цемента, выпускаемого опытным заводом НИИцемента (г. Подольск), позволяет улучшить технико-экономические показатели их производства. В этом случае не потребуются дополнительного помола, облегчается грануляция сырьевой муки, снижается температура обжига, уменьшается расход топлива.

При существующем дефиците технического глинозема глиноземная пыль является дополнительным источником высокоглиноземистого сырья для огнеупорной промышленности. Нами исследована возможность использования глиноземной пыли электрофилтров печей кальцинации глиноземного производства в качестве альтернативного источника высокоглиноземистого сырья для производства различных высокоглиноземистых изделий.

Технология получения высокоглиноземистых изделий по многоступенчатому способу, наиболее широко распространенному в нашей промышленности, подразумевает дополнительную переработку технического глинозема. Переработка заключается в дополнительном обжиге глинозема при температуре не ниже 1450 °C с выдержкой при конечной температуре 3–5 ч для получения

Ранее [1] были исследованы различные способы подготовки массы для получения высокоглиноземистого шамота с содержанием ≥ 68 и ≥ 80 % Al_2O_3 : смешивание глиноземной пыли и глины, использование предварительно молотой пыли с последующим смешиванием ее с глиной и совместный помол пыли и глины в шаровой мельнице в течение 2, 4 и 6 ч. Подготовленные массы брикетировали методом пластического формования, сушили и обжигали при 1500, 1550 и 1600 °C.

Высокоглиноземистый шамот для изготовления изделий должен характеризоваться водопоглощением не более 1,3 %. Исследование показало, что массы с добавкой 20 % глины с использованием немолотого глинозема и глинозема различной степени помола после обжига при 1550 °C имеют водопоглощение менее 1,3 % и значительную механическую прочность. Однако муллитобразование в массах завершалось только после обжига при 1600 °C. Некоторое уменьшение плотности образцов после обжига при 1600 °C почти не зависело от использования глиноземной пыли различной степени помола.

При изготовлении высокоглиноземистого шамота с содержанием 80 % Al_2O_3 опробованы два способа подготовки массы: 1 — с добавкой глинозема без предварительного помола и 1–2 — с добавкой глинозема, молотого в течение 2 ч. Массы имеют водопоглощение 0,6 и 0,4 %, одинаковую открытую пористость 0,9 % и очень высокую ме-

ханическую прочность. Предел прочности при сжатии составляет 285,9 и 226,6 МПа соответственно.

Исследование масс совместного помола показало, что массы муллитового и муллитокорундового составов спекаются лучше, чем массы с добавлением предварительно молотой глиноземной пыли; муллитобразование во всех массах идет при 1600 °С, о чем свидетельствует уменьшение кажущейся плотности $\rho_{\text{каж}}$, ее величина значительно больше, чем для масс без совместного помола. Так, уменьшение $\rho_{\text{каж}}$ масс с 20 % Al_2O_3 достигает 9 %, масс с 62 % Al_2O_3 13,4 %. Это указывает на то, что муллитобразование в этих массах идет лучше; для совместного помола всех масс достаточно продолжительности 2 ч.

Из выбранных масс были получены высокоглиноземистые изделия методом полусухого прессования. Свойства образцов после сушки и обжига представлены в табл. 1. Полученные в результате исследования образцы муллитокорундового (составы 1, 1–2) и муллитового составов (состав 2–2) по физико-керамическим показателям соответствуют изделиям муллитокорундовым и муллитовым общего назначения по ТУ 14-8-556–87.

Проведенным исследованием использования глиноземной пыли, уловленной электрофилтратом в технологии муллитокорундовых (не менее 72 % Al_2O_3) и муллитовых (не менее 62 % Al_2O_3) изделий установлено:

- тонкодисперсный глиноземсодержащий материал (пыль) можно использовать при изготовлении муллитокорундовых изделий без предварительного помола, поскольку полученные изделия (с содержанием не менее 72 % Al_2O_3) по физико-керамическим и термомеханическим показателям соответствуют выпускаемым промышленностью;

- изделия муллитового состава можно изготавливать с использованием шамота, полученного совместным помолом глины и глиноземсодержащей пыли; полученные изделия по своим свойствам аналогичны выпускаемым промышленностью.

Дальнейшие физико-химические и технологические исследования пыли печей кальцинации глинозема позволили установить [4–7], что пыль имеет достаточно высокое содержание Al_2O_3 , необходимые химический, фазовый и дисперсный составы, а также хорошую спекаемость при введении добавок, чтобы служить сырьем для керамической, огнеупорной и абразивной промышленности.

С учетом указанных недостатков и преимуществ исследуемой глиноземной пыли, принимая во внимание также ее более низкие цены по сравнению со специально выпускаемыми марками глинозема, можно ожидать наиболее вероятные области ее применения в ряде производств: высокоглиноземистого цемента, плавящихся огнеупорных материалов (корунда, муллита, шпинели), алюмосиликатного волокна, алюмофосфатных связок и алюмогелей; теплоизоляционных и высокоглиноземистых огнеупоров. Возможны и другие области применения глиноземной пыли, например в производстве пигментов (красок), полимерных композиционных материалов и др.

Глиноземная пыль востребована для производства огнеупорных и вяжущих материалов на Подольском опытном заводе НИИцемента, Подольском, Семилукском, Боровичском, Восточно-Сибирском, Богдановичском огнеупорных заводах и других предприятиях.

В связи с отбором части глиноземной пыли и увеличением загрузки гидроксида алюминия во вращающуюся печь проведен расчет тепловых и энергетических затрат баланса печи при кальцинации.

Для подачи глиноземной пыли электрофилтратов в печь с помощью двух пневмоподъемников расходуется 900 м³/ч* так называемого неорганизованного воздуха на одну печь (по данным ОАО БАЗ-СУАЛ), который, имея температуру 180 °С, нагревается до 250 °С — температуры отходящих газов. На нагрев затрачивается часть тепла, поэтому при исключении подачи пыли от электрофилтратов в печь затрат энергии на ввод неорганизованного воздуха и дополнительного расхода те-

* Здесь и далее при нормальных условиях.

Таблица 1. Свойства муллитовых и муллитокорундовых образцов

Масса	После сушки		После обжига при 1500 °С (выдержка 2 ч)				
	кажущаяся плотность, г/см ³	открытая пористость, %	линейная усадка, %	водопоглощение, %	кажущаяся плотность, г/см ³	открытая пористость, %	предел прочности при сжатии, МПа
1	2,72	18,1	0,6	5,7	2,78	15,9	84,2
1–2	2,78	15,7	0,5	4,9	2,76	17,3	67,5
2–2	2,43	17,2	0,5	5,6	2,38	19,3	43,8

пла будет меньше. В результате появляется возможность увеличить разрежение во вращающейся печи и ее тепловую нагрузку. Необходимо также учитывать возрастающую крупность глинозема в связи с выводом мелкокристаллической пыли электрофильтров.

Ниже приведены два варианта теплового баланса процесса кальцинации [1], различающихся вводом и выводом оборотной глиноземной пыли.

Тепловой баланс процесса кальцинации гидроксида алюминия в трубчатой вращающейся печи с холодильником «кипящего слоя» с использованием оборотной пыли (1-й вариант)

Расчет произведен на 1 кг глинозема.

Приход тепла

1. Химическое тепло при сгорании топлива

$$Q_1 = H_T Q_H^p = 33278,7 H_T \text{ кДж},$$

где H_T — удельный расход топлива на процесс кальцинации (искомая величина), $\text{м}^3/\text{кг}$; Q_H^p — низшая теплотворная способность топлива, $\text{кДж}/\text{м}^3$.

2. Физическое тепло топлива

$$Q_2 = H_T C_T t_T = H_T \cdot 1,553 \cdot 4,7 = 7,299 H_T \text{ кДж}$$

где C_T — средняя теплоемкость топлива, $\text{кДж}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$; t_T — средняя температура топлива, $^\circ\text{C}$.

3. Тепло гидроксида алюминия

$$Q_3 = G_m C_m t_m = 1,53 \cdot 1,18 \cdot 40 = 72,216 \text{ кДж},$$

где G_m — количество сухого гидроксида, загружаемого в печь, кг; C_m — средняя теплоемкость гидроксида алюминия, $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$; t_m — средняя температура гидроксида алюминия, $^\circ\text{C}$.

4. Тепло гигроскопической воды в гидроксиде алюминия

$$Q_4 = G_{г.вл} C_{г.вл} t_{г.вл} = 0,157 \cdot 4,186 \cdot 40 = 26,288 \text{ кДж},$$

где $G_{г.вл}$ — количество гигроскопической воды в гидроксиде алюминия, кг,

$$G_{г.вл} = (1,53 \cdot \%H_2O) / (100 - \%H_2O) = (1,53 \cdot 9,3) / (100 - 9,3) = 0,157,$$

где $\%H_2O$ — средняя влажность гидроксида алюминия; $C_{г.вл}$ — средняя теплоемкость воды, $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$; $t_{г.вл}$ — температура внешней влаги, $^\circ\text{C}$.

5. Теплосодержание воздуха, поступающего в печь при сжигании топлива,

$$Q_5 = \alpha V_T^B H_T (C_{перв}^B t_{перв}^B \cdot \%V_{перв} + C_{подс}^B t_{подс}^B \cdot \%V_{подс}) = 1,17 \cdot 9,5 \cdot H_T (1,327 \cdot 412 \cdot 0,643 + 1,297 \cdot 20 \cdot 0,357) = 4010,325 H_T, \text{ кДж},$$

где α — коэффициент избытка воздуха; V_T^B — удельное количество воздуха, теоретически необходимого для сжигания топлива, $\text{м}^3/\text{м}^3$; $\%V_{перв}$ — содержание в общем объеме первичного воздуха, поступающего в печь на горение топлива, воздуха из холодильника (фактические замеры); $\%V_{подс}$ — доля воздуха от общего его количества, поступающего на горение топлива (подсасываемого через неплотности в горячей головке печи из окружающей среды), определяется по разнице общего количества воздуха и воздуха из холодильника; $C_{перв}^B, t_{перв}^B, C_{подс}^B, t_{подс}^B$ — средние теплоемкости и температуры первичного и подсасываемого воздуха соответственно.

$$\alpha = N_2 / (N_2 - 3,762 O_2) = \{100 - (CO_2 + O_2)\} / \{100 - (CO_2 + O_2) - 3,762 O_2\} = \{100 - (6,4 + 3,5)\} / \{100 - 9,9 - 3,762 \cdot 3,5\} = 1,17,$$

где O_2 — содержание кислорода в отходящих газах из печи, %; $N_2 = 100 - (CO_2 + O_2)$ — содержание азота в отходящих газах, %; CO_2 — содержание диоксида углерода в отходящих газах, %.

$$V_T^B = V_{O_2} / 0,21 = 1,991 / 0,21 = 9,5 \text{ м}^3/\text{м}^3,$$

где V_{O_2} — объем кислорода воздуха, необходимого для сжигания 1 м^3 газа; 0,21 — объемная доля O_2 в воздухе.

$$V_{O_2} = 0,01(2CH_4 + 3,5C_2H_6 + 5C_3H_8) = 0,01(2 \cdot 98,81 + 3,5 \cdot 0,35 + 5 \cdot 0,06) = 1,991 \text{ м}^3/\text{м}^3,$$

где CH_4, C_2H_6 — содержание в топливе соответствующих компонентов, %.

6. Тепло оборотной пыли

$$Q_6 = G_{об.п} C_{об.п} t_{об.п} = 2,05 \cdot 1,214 \cdot 180 = 447,966 \text{ кДж},$$

где $G_{об.п}$ — количество оборотной пыли, кг; $C_{об.п}$ — средняя теплоемкость оборотной пыли, $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$; $t_{об.п}$ — средняя температура оборотной пыли, $^\circ\text{C}$.

7. Тепло экзотермических реакций

$$Q_7 = 320,229 \alpha = 320,229 \cdot 0,25 = 80,057 \text{ кДж}/\text{кг } Al_2O_3,$$

где 320,229 $\text{кДж}/\text{кг } Al_2O_3$ — тепловой эффект реакции перекристаллизации $\gamma-Al_2O_3$ в $\alpha-Al_2O_3$; 0,25 — доля $\alpha-Al_2O_3$ в глиноземе.

8. Тепло неорганизованного воздуха

$$Q_8 = G_{неорг}^B C_{неорг}^B t_{неорг}^B.$$

Количество неорганизованного воздуха (по данным БАЗ — СУАЛ), подаваемого вместе с пылью электрофильтров в печь, составляет 900 $\text{м}^3/\text{ч}$. Рассчитаем количество этого воздуха на 1 кг глинозема. Производительность печи составляет 20 т/ч, тогда на 1 кг глинозема приходится $900/20000 = 0,045 \text{ м}^3$ воздуха.

$$Q_8 = 0,045 \cdot 1,327 \cdot 180 = 10,748 \text{ кДж.}$$

Итого приход тепла:

$$\begin{aligned} Q_{\text{прих}} &= Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 + Q_7 + Q_8 = \\ &= 33278,7H_T + 7,299H_T + 72,216 + 26,288 + \\ &+ 4010,325H_T + 447,966 + 80,057 + 10,748 = \\ &= 37296,324H_T + 637,275 \text{ кДж/кг.} \end{aligned}$$

Расход тепла

1. С прокаленным глиноземом

$$Q_1 = 1,0C_{\text{гл}}t_{\text{гл}} = 1,0 \cdot 1,122 \cdot 1000 = 1122,0 \text{ кДж,}$$

где $C_{\text{гл}}$ — средняя теплоемкость глинозема при данной температуре, кДж/(кг·°С); $t_{\text{гл}}$ — температура глинозема на выходе из барабана печи, °С.

2. С продуктами сгорания

$$Q_2 = V_d C_d t_d H_T = [12,098 + 9,5(1,17 - 1)] \cdot H_T \cdot 250 \times 1,394 = 4778,98H_T, \text{ кДж,}$$

где V_d — удельное количество отходящих газов, м³/м³,

$$V_d = V_d^0 t_d V_t^0 (\alpha - 1,0);$$

C_d — средняя теплоемкость отходящих газов, кДж/(кг·°С); t_d — средняя температура отходящих газов (из практики), °С; V_d^0 — теоретическое количество отходящих газов, образующихся при сжигании 1 м³ газа,

$$V_d^0 = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{N}_2} + V_{\text{O}_{2\text{изб}}},$$

где $V_{\text{CO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}}$ — теоретические объемы продуктов сгорания газа при сжигании 1 м³ природного газа, м³/м³; V_{N_2} — объем азота, поступающего с воздухом на сжигание 1 м³ природного газа с учетом коэффициента избытка, м³/м³; $V_{\text{O}_{2\text{изб}}}$ — избыток кислорода, поступающего с воздухом на сжигание 1 м³ природного газа, м³/м³; $V_{\text{O}_{2\text{изб}}} = \text{O}_2(\alpha - 1)$.

$$\begin{aligned} V_{\text{CO}_2} &= 0,01(\text{CO}_2 + \text{CH}_4 + 2\text{C}_2\text{H}_6 + 3\text{C}_3\text{H}_8) = \\ &= 0,01(0,01 + 98,81 + 2 \cdot 0,35 + 3 \cdot 0,06) = \\ &= 0,997 = 1 \text{ м}^3/\text{м}^3. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_{\text{H}_2\text{O}} &= 0,01(2\text{CH}_4 + 3\text{C}_2\text{H}_6 + 4\text{C}_3\text{H}_8) = \\ &= 0,01(2 \cdot 98,81 + 3 \cdot 0,35 + 4 \cdot 0,06) = \\ &= 1,989 = 1,99 \text{ м}^3/\text{м}^3. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_{\text{N}_2} &= 0,01\text{N}_2 + \alpha K V_{\text{O}_2} = 0,01 \cdot 0,77 + 1,17 \cdot 3,76 \cdot V_{\text{O}_2} = \\ &= 0,01 \cdot 0,77 + 1,17 \cdot 3,76 \cdot 1,991 = 8,767 \text{ м}^3/\text{м}^3. \end{aligned}$$

$$V_{\text{O}_{2\text{изб}}} = (1,17 - 1) \cdot 1,991 = 0,34.$$

$$V_d^0 = 1,0 + 1,991 + 8,767 + 0,34 = 12,098 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

3. Тепло на реакцию дегидратации гидроксида алюминия и на образование $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$:

$$Q_3 = 249,07 + 467,16 = 716,23 \text{ кДж/кг.}$$

4. Тепло на испарение влаги

$$Q_4 = (G_{\text{г.вл}} + G_{\text{кр.вл}}) \cdot 595 = (0,157 + 0,53) \cdot 2490,67 = 1711,09 \text{ кДж,}$$

где $G_{\text{г.вл}}$ — количество гигроскопической воды в гидроксиде алюминия, кг,

$$\begin{aligned} G_{\text{г.вл}} &= 1,53 \cdot \% \text{H}_2\text{O} / (100 - \% \text{H}_2\text{O}) = \\ &= 1,53 \cdot 9,3 / (100 - 9,3) = 0,157; \end{aligned}$$

$G_{\text{кр.вл}}$ — количество кристаллизационной воды в гидроксиде алюминия, кг,

$$G_{\text{кр.вл}} = 3 \cdot 18 / 102 = 0,53.$$

5. Тепло на нагрев водяных паров до температуры отходящих газов

$$\begin{aligned} Q_5 &= (G_{\text{г.вл}} + G_{\text{кр.вл}}) t_{\text{вл}} C_{\text{вл}} / 0,804 = \\ &= (0,157 + 0,53) \cdot 250 \cdot 1,53 = 326,84 \text{ кДж/кг,} \end{aligned}$$

где $t_{\text{вл}}$ — средняя температура водяного пара (по температуре отходящих газов), °С; $C_{\text{вл}}$ — средняя теплоемкость водяного пара, кДж/(м³·°С); 0,804 — плотность водяного пара, кг/м³.

6. Тепло с пылью в отходящих газах

$$Q_6 = G_{\text{об.п}} t_{\text{об.п}} C_{\text{об.п}} = 2,05 \cdot 250 \cdot 1,27 = 650,88 \text{ кДж/кг.}$$

7. Теплопотери в окружающую среду поверхностью барабана печи (7 % от прихода тепла)

$$\begin{aligned} Q_7 &= 0,07(37296,324H_T + 637,275) = \\ &= 2610,74H_T + 44,61, \text{ кДж/кг.} \end{aligned}$$

8. Тепло от недожога газа

$$Q_8 = \beta H_T Q_H^0 = 0,02H_T \cdot 33278,7 = 665,57H_T, \text{ кДж,}$$

где β — коэффициент, определяющий потери тепла от недожога топлива (2 % от химически сгоревшего топлива).

9. Тепло на нагрев неорганизованного воздуха до температуры отходящих газов (250 °С)

$$\begin{aligned} Q_9 &= C_{\text{неорг}}^B \Delta t_{\text{неорг}}^B G_{\text{неорг}}^B = 1,327(250 - 180) \cdot 0,045 = \\ &= 4,18 \text{ кДж.} \end{aligned}$$

Итого расход тепла

$$\begin{aligned} Q_{\text{расх}} &= 1122,0 + 4778,98H_T + 716,23 + 1711,09 + \\ &+ 326,84 + 650,88 + 2610,74H_T + 44,61 + 665,57H_T + \\ &+ 4,18 = 8055,26H_T + 4575,83 \text{ кДж.} \end{aligned}$$

Тогда из уравнения теплового баланса $Q_{\text{прих}} = Q_{\text{расх}}$

$$Q_{\text{прих}} = 37296,32H_T + 637,275;$$

$$Q_{\text{расх}} = 8055,26H_T + 4575,83$$

имеем

$$37296,32H_T - 8055,26H_T = 4575,83 - 637,27,$$

$$29241,06H_T = 3938,56,$$

$$H_T = 0,1347 \text{ м}^3/\text{кг},$$

или $0,1347 \cdot 7950/7000 = 0,1529$ кг условного топлива тратится на получение 1 кг глинозема.

Тепловой баланс процесса кальцинации гидроксида алюминия в трубчатой вращающейся печи с холодильником «кипящего слоя» с выводом пыли электрофильтров из оборота (2-й вариант)

В приходной части баланса изменится статья 6 и исчезнет статья 8, в расходной части исчезнет статья 9. Количество оборотной пыли уменьшится на 10 % и составит $2,05 - 2,05 \cdot 0,1 = 1,845$ кг.

Статья 8 из приходной части и статья 9 из расходной части исчезнут, так как в печь не будут по-

даваться пыль от электрофильтров и дополнительный воздух. Все остальные статьи теплового баланса останутся без изменения.

Приход тепла

6. Тепло оборотной пыли

$$Q_6 = G_{об.п} C_{об.п} t_{об.п} = 1,845 \cdot 1,214 \cdot 180 = 403,16 \text{ кДж}.$$

Тогда приход тепла составит:

$$\begin{aligned} Q_{пр} &= Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 + Q_7 = \\ &= 33278,7H_T + 7,299H_T + 72,216 + 26,288 + \\ &+ 10,325H_T + 403,16 + 80,057 = 37296,324H_T + \\ &+ 581,72 \text{ кДж}. \end{aligned}$$

Расход тепла

$$\begin{aligned} Q_{расх}^* &= Q_{расх} - Q_9 = 8055,26H_T + 4575,83 - 4,18 = \\ &= 8055,26H_T + 4571,65 \text{ кДж}. \end{aligned}$$

Таблица 2. Тепловой баланс процесса кальцинации гидроксида алюминия в трубчатой вращающейся печи

Статья	Вариант	
	с оборотом пыли отходящих газов	с выводом пыли от электрофильтров из оборота
<i>Приход тепла, кДж</i>		
1. Тепло от сгорания топлива Q_1	$33278,700H_T$	$33278,700H_T$
2. Физическое тепло топлива Q_2	$7,299H_T$	$7,299H_T$
3. Тепло гидроксида алюминия Q_3	72,216	72,216
4. Тепло гигроскопической воды гидроксида алюминия Q_4	26,288	26,288
5. Теплосодержание воздуха, подаваемого в печь для сжигания топлива, Q_5	$4010,325H_T$	$4010,325H_T$
6. Тепло оборотной пыли Q_6	447,966	403,160
7. Тепло экзотермических реакций Q_7	80,057	80,057
8. Тепло дополнительного (неорганизованного) воздуха Q_8	10,748	—
Итого приход тепла	$37296,324H_T + 637,275$	$37296,324H_T + 581,720$
<i>Расход тепла, кДж</i>		
1. С прокаленным глиноземом Q_1	1122,000	1122,000
2. С продуктами горения Q_2	$4778,98H_T$	$4778,98H_T$
3. Тепло на реакцию дегидратации гидроксида алюминия и на образование $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ Q_3	716,230	716,230
4. Тепло на испарение влаги Q_4	1711,090	1711,090
5. Тепло на нагрев водяных паров до температуры отходящих газов Q_5	326,840	326,840
6. Тепло с пылью в отходящих газах Q_6	650,880	650,880
7. Теплотери поверхностью барабана печи (7 % от прихода тепла) Q_7	44,640	44,640
8. Теплотери от недожога газа Q_8	$665,570H_T$	$665,570H_T$
9. Тепло на нагрев дополнительного (неорганизованного) воздуха до температуры отходящих газов (250 °C) Q_9	4,18	—
Итого расход тепла $Q_{расх}$	$8055,26H_T + 4575,83$	$8055,26H_T + 4571,65$
Тепловой баланс $Q_{прих} = Q_{расх}$	$8055,26H_T + 4575,83$	$8055,26H_T + 4571,65$
Удельный расход топлива на 1 кг глинозема H_T , м ³ /кг	0,1347 (0,1529 кг условного топлива)	0,1364 (0,1549 кг условного топлива)

Окончательный вид уравнения теплового баланса будет следующим:

$$37296,32H_T + 581,72 = 8055,26H_T + 4571,65,$$

$$37296,32H_T - 8055,26H_T = 4571,65 - 581,72,$$

$$29241,06H_T = 3989,93,$$

$$H_T = 3989,93/29241,06 = 0,1364 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Таким образом, в 1-м варианте $H_T = 0,1347 \text{ м}^3/\text{кг Al}_2\text{O}_3$, или $0,1529 \text{ кг условного топлива/кг Al}_2\text{O}_3$, а во 2-м варианте $H_T = 0,1364 \text{ м}^3/\text{кг Al}_2\text{O}_3$, или $0,1549 \text{ кг условного топлива/кг Al}_2\text{O}_3$. Следовательно, в варианте с выводом пыли электрофильтров из общей массы расход топлива практически не изменится. Результаты расчетов сведены в табл. 2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При выводе пыли из оборота при производстве глинозема исключаются затраты на подачу и нагрев дополнительного воздуха, что позволит увеличить разрежение в печи и ее тепловую нагрузку. Полное исключение из оборота мелкодисперсной пыли электрофильтров позволит несколько увеличить крупность глинозема, что благоприятно повлияет на процесс электролиза. Расчет теплового баланса печи кальцинации показал, что расход топлива при прокаливании 1 т глинозема практически не изменится. В тепловом балансе уменьшится статья прихода тепла за счет изъятия пыли электрофильтров, однако расхода тепла на нагрев воздуха с этой пылью от 180 до 250 °С не будет.

На Богословском алюминиевом заводе пыль электрофильтров стали подавать в последнюю секцию холодильника «кипящего слоя», что позволило несколько увеличить производительность агрегата кальцинации по готовому глинозему. Однако при этом в глинозем попадают примеси из пыли, что нежелательно. В связи с этим пыль электрофильтров рекомендуется использовать для производства огнеупоров, что расширит номенклатуру товарной продукции. Проведенные исследования в этом направлении показали целесообразность такого варианта.

Таким образом, вывод пыли электрофильтров из оборота при производстве глинозема позволит

сократить расход энергии на ввод и нагрев дополнительного сжатого воздуха, увеличив при этом разрежение в печи и ее полезную тепловую нагрузку; получить более крупный глинозем; расширить ассортимент продукции для нужд завода и других потребителей.

Библиографический список

1. Выбор оборудования для перемещения и складирования глиноземной пыли и разработка технологии ее утилизации : отчет о НИР / ООИ «ВЕРА» – ОАО «БАЗ-СУАЛ» ; рук. работы С. Я. Давыдов. — Екатеринбург, 2000. — 154 с.
2. **Давыдов, С. Я.** Вращающиеся печи предприятий строительных материалов : учеб. пособие / С. Я. Давыдов, В. А. Пьячев, И. Д. Кащеев // Екатеринбург : ГОУ ВПО УГТУ–УПИ, 2006. — 352 с.
3. **Завадский, К. Ф.** Увеличение производительности кальцинации гидроксида алюминия / К. Ф. Завадский, А. А. Рукомойкин, С. Я. Давыдов [и др.] // VI региональная научно-практическая конференция «Алюминий Урала-2001». Краснотурьинск : ОАО БАЗ, 2001. — С. 85, 86.
4. **Сысоев, А. В.** Увеличение производительности кальцинации гидроксида алюминия / А. В. Сысоев, А. Н. Аминов, К. Ф. Завадский [и др.] // Тр. Межд. конгресса «300 лет уральской металлургии» (секция «Производство алюминия и изделий из него»). — Екатеринбург – Каменск-Уральский, 4 октября 2001 г. — С. 45.
5. **Давыдов, С. Я.** Использование кипящего слоя для энергосберегающего пневмоподъема мелкодисперсной пыли / С. Я. Давыдов // Новые огнеупоры. — 2012. — № 8. — С. 17–22.
6. **Каменских, В. А.** Получение высокоглиноземистого шамота на основе пыли электрофильтров печей кальцинации глиноземного производства / В. А. Каменских, С. Я. Давыдов, К. Г. Земляной, М. В. Денисова // Тр. Межд. конгресса «300 лет уральской металлургии». — Екатеринбург, 2001. — С. 264–265.
7. **Давыдов, С. Я.** Энергосберегающее оборудование для транспортировки сыпучих материалов : исследование, разработка, производство / С. Я. Давыдов. — Екатеринбург : ГОУ ВПО УГТУ–УПИ, 2007. — 317 с. ■

Получено 29.01.13

© С. Я. Давыдов, Н. П. Косарев, Н. Г. Валиев,
Г. Н. Бездежский, И. Д. Кащеев,
В. Н. Корюков, 2013 г.