DOI 10.18454/PMI.2016.4.587

УДК 62-626.3

НАПРАВЛЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НИЗКОСОРТНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ТОПЛИВА В ПРОИЗВОДСТВЕ ГЛИНОЗЕМА

О.А.ДУБОВИКОВ, **В.Н.БРИЧКИН**
Санкт-Петербургский горный университет, *Россия*

Потребление энергии во всем мире по ряду причин: рост численности населения, индустриализация и быстрый экономический рост развивающихся стран – постоянно увеличивается. Наиболее распространенное газовое топливо – природный газ – имеет низкую себестоимость добычи. Она меньше аналогичного показателя для жидкого топлива в 2-3 раза, а для каменного угля в 6-12 раз. При передаче природного газа по трубопроводу на расстояние 1,5-2,5 тыс. км его себестоимость с учетом транспортных издержек в 1,5-2 раза ниже себестоимости каменного угля, при этом не нужны топливные склады. Установки, работающие на газовом топливе, обладают более высоким КПД по сравнению с установками, использующими другие виды топлива, они проще и дешевле в эксплуатации, сравнительно легко автоматизируются, что повышает безопасность и улучшает ведение технологического процесса, не требуют сложных устройств топливоподачи и золоудаления. Сгорает газ с минимальным количеством вредных выбросов, что улучшает санитарные условия и экологию. Однако в связи с истощением запасов основных источников энергии многие специалисты связывают будущее мировой энергетики с возможностями применения твердых энергоносителей. С экологической точки зрения наиболее предпочтительной является технология газификации твердого топлива. Внедрил и популяризовал применение искусственного газа английский механик Вильям Мёрдок. Он получил светильный газ, произведя сухую перегонку каменного угля. После изобретения немецким химиком Робертом Бунзеном газовой горелки светильный газ начал применяться в качестве бытового топлива. С изобретением в 1861 г. братьями Сименс промышленного газогенератора появилась возможность получать более дешевый генераторный газ, на который стали переводить промышленные печи. Так как теплота сгорания получаемого в результате газификации генераторного газа относительно мала по сравнению с природным газом, то в Горном университете были проведены исследования возможности использования различных видов низкосортного технологического топлива на глиноземных заводах России в качестве альтернативы природному газу, доступ к которому имеется не во всех регионах.

***Ключевые слова*:** мировая энергетика, уголь, мазут, природный газ, низкосортное технологическое топливо, глиноземные заводы, генераторный газ, калориметрическая температура горения, теоретическая температура горения.

Как цитировать эту статью: Дубовиков О.А. Направления и перспективы использования низкосортного технологического топлива в производстве глинозема / О.А.Дубовиков, В.Н.Бричкин // Записки Горного института. 2016. Т.220. С.587-594. DOI 10.18454/PMI.2016.4.587

По одному из прогнозов международной неправительственной организации (Римского клуба), мировые запасы сырьевых ресурсов, включая энергетические, сократятся в 3 раза к середине XXI в., а объем промышленного производства снизится. По другому прогнозу, ресурсы уменьшатся на треть, а объем промышленного производства останется на уровне начала века [2]. Для динамичного и устойчивого глобального развития техногенной цивилизации это неприемлемо. Однако эти прогнозы не учли возможности научно-технического прогресса по сокращению потребления энергии и использованию ее альтернативных источников, а также возросший технологический потенциал человечества.

Технология, а не минеральные ресурсы определяют сегодня направления развития научно-технического прогресса. Отсталая технология и вызванная этим высокая стоимость получаемого продукта тормозят его внедрение в смежные отрасли промышленности. Дефицит электрической энергии в мире связан и с непрерывно увеличивающимся объемом выпуска энергоемкой продукции. Знаменитые ранее своими гидроэнергетическими ресурсами восточно-сибирские регионы России испытывают сейчас нужду в электроэнергии, поскольку темпы роста производства алюминия опережают темпы развития энергетики. Сокращение потребления энергии в целом, электрической в частности, становится одним из приоритетных направлений развития современной металлургии.

Дефицит электроэнергии сопряжен с растущим дефицитом углеводородного сырья и металлургического кокса. Все активнее ведутся работы по переводу тепловых электростанций с природного газа на уголь. Если новые источники электроэнергии в будущем могут покрыть дефицит электроэнергии без видимого изменения технологии ее потребления, то исключить кокс из процесса восстановления железорудного сырья или получения углеграфитовых материалов невозможно без кардинального изменения технологии.

Проблема постепенного истощения крупных месторождений в отдаленной перспективе реально существует. Так, например, запасов основных источников энергии, по крайней мере, разведанных и легко добываемых с использованием существующих технологий, на сегодняшний день, по разным оценкам, осталось немного, правда низкосортных каустобиолитов человечеству должно хватить не менее чем на тысячу лет (табл.1) [8].

DOI 10.18454/PMI.2016.4.587

Таблица 1

Запасы ископаемых топлив в мире, млрд т у.т.

Природное топливо	Разведанные запасы		Прогнозируемые запасы	
	минимальные	максимальные	минимальные	максимальные
Твердое (каустобиолиты)	450	830	5000	12000
Нефть и газовый конденсат	95	150	220	450
Углеводороды в битумных песках и сланцах	90	120	370	730
Природный газ	65	100	240	370
Итого	700	1200	5830	13550

Возможны следующие решения этой проблемы: 1) интенсификация геолого-разведочных работ и использование новых способов получения электроэнергии; 2) совершенствование технологии извлечения и переработки природных ископаемых и техногенного сырья; 3) сокращение потребления ресурсов.

Первый вариант – вариант экстенсивного освоения сырьевых и энергетических ресурсов – еще не закончился, но по нефти и газу его ограниченность становится все более очевидной. Это вынуждает приступать к освоению труднодоступных источников углеводородов, прокладывать новые газо- и нефтепроводы. По понятным причинам не будет принят и третий вариант.

О целесообразности совершенствования технологии извлечения, переработки природного и техногенного сырья говорят много, но, по существу, положение в лучшую сторону меняется неоправданно медленно. В 2007 г. при содействии правительства страны прошел общегерманский конгресс «Международные сырьевые рынки», организованный федеральным союзом немецкой индустрии. Участники конгресса акцентировали внимание на том, что сырьевая безопасность Германии не ограничивается одним лишь стабильным снабжением экономики нефтью и газом, а включает в себя и доступ к запасам металлов в недрах, так как подавляющая часть промышленных изделий, с которыми Германия выступает на мировых рынках, базируется на металлосодержащем сырье. От его импорта и, соответственно, от международных сырьевых рынков всецело зависит национальная экономика Германии. До 2020 г. планируется увеличить общую эффективность металлосырьевого сектора почти вдвое. Сделать это предполагается, как минимум, за счет высокотехнологичного, оптимизированного использования сырья и материалов, развития вторичного перерабатывающего сектора [15].

Экономика этих стран – Германии, чрезвычайно зависимой от импорта сырья, и России, практически на 100 % обеспеченная собственным сырьем, в значительной степени связана с мировыми ценами на сырье. Сложнее дело обстоит в России. Для России эта связь проявляется гораздо сильнее, поскольку характерные для нее сложные горно-технические и климатические условия снижают конкурентоспособность российского сырья в условиях открытой экономики. Продавать его за границу невыгодно, при использовании внутри страны возникает проблема себестоимости и нормы прибыли продукции, которая также ориентирована на зарубежные рынки. В связи с этим следует обратить внимание на особую в современных условиях рациональность варианта, по которому будут вынуждены уже в ближайшее время развиваться экономики стран менее, чем Россия, обеспеченные минерально-сырьевыми ресурсами, – совершенствование технологии добычи и переработки минерального сырья.

Ситуация на мировом рынке глинозема и алюминия для повышения конкурентоспособности требует дальнейшего снижения энергозатрат и себестоимости получаемой продукции.

Потребление энергоресурсов для лучших зарубежных заводов, перерабатывающих высококачественные бокситы по технологии Байера, составляет порядка 7-8 ГДж на 1 т глинозема, а для отечественных заводов с низкокачественным сырьем этот показатель превышает 54 ГДж/т. Прежде всего, это обусловлено качеством используемого сырья. Если за рубежом при получении глинозема способом Байера в качестве сырья используют бокситы с кремниевым модулем порядка 10-12 и содержанием Al_2O_3 на уровне 50-55 %, то нефелиновое сырье характеризуется кремниевым модулем порядка 0,65 при содержании Al_2O_3 порядка 25-26 %.

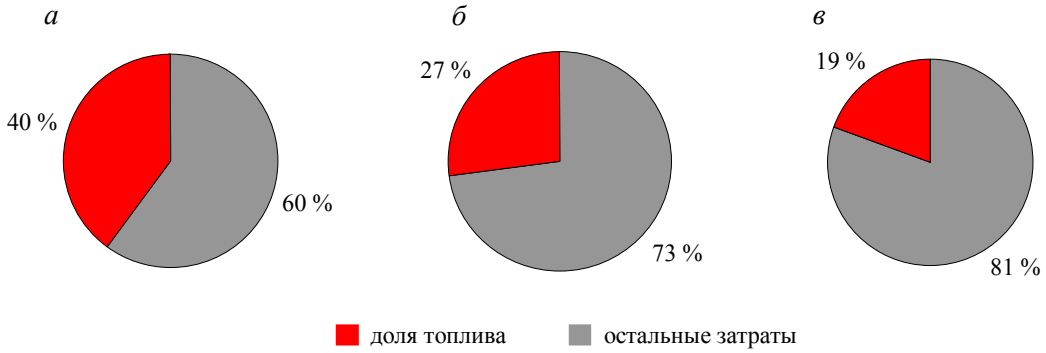
Наибольший интерес представляет ОАО «РУСАЛ Ачинск» (АГК), на котором применяется уникальная технология, не имеющая мировых аналогов получения глинозема из нефелинов методом спекания. Несмотря на особенности исходного сырья, о которых сказано выше, близость к источнику сырья, потребителям металлургического глинозема, наличие собственной ТЭЦ, работающей на дешевом угле, и получение попутной продукции делают технологию спекания не только вполне конкурентоспособной, но выводят комбинат на одно из первых мест среди предприятий компании по себестоимости. Тем не менее в случае технологии спекания основная часть энергозатрат при производстве глинозема приходится на переделы спекания и кальцинации [18].

DOI 10.18454/PMI.2016.4.587

Если для передела кальцинации есть стандартные многократно проверенные решения [11], то в случае передела спекания, как правило, приходится адаптировать аппаратные решения из других отраслей [16] или использовать новую комбинацию известных аппаратов [14], искать пути улучшения технологии [10].

Замена и модернизация аппаратурного оформления процесса спекания на действующем производстве требуют значительных капитальных вложений и длительного срока адаптации аппаратурных решений под уникальную технологию, что отрицательно сказывается на экономических показателях модернизации. Одним из возможных путей снижения затрат на переделе спекания является подбор и внедрение более дешевого топлива. Наибольший интерес представляет использование в качестве топлива углей расположенного в непосредственной близости Канско-Ачинского буроугольного бассейна (КАБ), в котором открытым способом добывают дешевые малозольные бурые угли.

Как показывают оценочные расчеты, перевод на угольное топливо позволит снизить долю топлива в структуре себестоимости продукции комбината (см.рисунок).



Оценочная доля затрат на топливо в себестоимости глинозема: *а* – мазутное топливо; *б* – каменный уголь; *в* – бурый уголь

Угли Канско-Ачинского буроугольного бассейна характеризуются низкой теплотворной способностью ($Q_н^р$ =3,5-3,8 Мкал/кг), высокими влажностью ($W^р$ =33 % и более) и содержанием летучих (45-48 %), что накладывает определенные сложности при использовании их в качестве технологического топлива передела спекания.

Необходимо отметить, что особенности использования бурых углей КАБ на переделе спекания относятся именно к АГК с учетом технологических свойств, месторасположения и инфраструктуры. В свое время, детально изучив технологические и экономические проблемы нефтепереработки, Д.И.Менделеев предложил строить нефтеперерабатывающие заводы в местах концентрированного потребления нефтепродуктов.

Переход на твердое топливо кроме очевидных экономических преимуществ сопровождается некоторыми технологическими сложностями. В случае использования угля кроме факторов первого порядка, связанных с характеристиками горения, необходимо учитывать вторичное влияние на процесс спекообразования через золу топлива.

Внедрение системы корректировки модулей шихты при изменении зольности и структуры топлива позволит в определенной степени стабилизировать качество спека [4], а благодаря значительности запасов, близости к потенциальным потребителям, относительной легкости добычи бурые угли постоянно рассматриваются как альтернативный источник топлива [1, 5].

Газификация угля – еще одна из перспективных технологий использования твердых энергоносителей. Главным преимуществом газификации твердого топлива является низкий уровень негативного воздействия на окружающую среду. В результате более полного сгорания газообразного топлива образуется в разы, а по некоторым позициям и на порядки меньшее количество вредных для окружающей среды химических соединений, как в дымовых газах, так и в зольном остатке. Это позволяет экономить на дорогостоящем оборудовании очистки дымовых газов, выбрасываемых в атмосферу, и оборудовании обеззараживания твердых вторичных отходов.

В силу относительно невысокой теплотворной способности получаемого в результате газификации генераторного газа необходимо было изучить процесс горения генераторного газа. Для изучения

DOI 10.18454/PMI.2016.4.587

был выбран смешанный генераторный газ следующего состава, % по объему: 5,0 CO_2; 0,3 H_2S; 0,3 C_mH_n; 26,5 CO; 13,5 H_2; 2,3 CH_4; 51,9 N_2; 0,2 O_2 и влажностью W = 5,7 г/м^3.

В табл.2 приведены основные показатели процесса горения генераторного газа при принятом коэффициенте избытка воздуха α = 1,10.

Таблица 2

Рассчитанные показатели горения генераторного газа

Показатель	Значение
Теплотворная способность $Q_н^р$, кДж/м^3	5866
Теоретическое количество воздуха $L_{теор}$, м^3/м^3	1,22
Практическое количество воздуха $L_{пр}$, м^3/м^3	1,35
Количество образующихся газообразных продуктов горения $V_г$, м^3/м^3	2,15
Состав продуктов горения, % по объему:	
CO_2	15,92(1 – x)
CO	15,92x
H_2O	9,23(1 – y)
H_2	9,23y
N_2	73,52
O_2	1,19 + 0,5(15,92x + 9,23y)
SO_2	0,14
Плотность продуктов сгорания ρ, кг/м^3	1,33
Теплосодержание продуктов горения i_0, кДж/м^3 (ккал/м^3)	2728
Калориметрическая температура процесса горения $t_к$, °С при расчете калориметрической температуры	1646
Степень диссоциации для диоксида углерода x	0
Степень диссоциации для водяного пара y	0

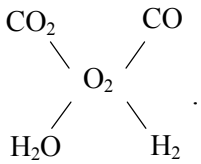
Поскольку калориметрическая температура горения практически недостижима из-за расхода тепловой энергии на частичную диссоциацию продуктов горения, то рассчитывают теоретическую температуру, учитывая частичную диссоциацию диоксида углерода и водяного пара [6, 9]. Процесс диссоциации описывается термохимическими уравнениями:

$$CO_2 \leftrightarrow CO + 0{,}5O_2 - 3045 \text{ ккал/м}^3;$$

$$H_2O \leftrightarrow H_2 + 0{,}5O_2 - 2580 \text{ ккал/м}^3.$$

Быстро, но приблизительно, можно определить теоретическую температуру горения с использованием графической зависимости степени диссоциации от температуры и парциального давления компонентов [6, 9, 13].

Для точного определения теоретической температуры необходимо учитывать, что в продуктах сгорания одновременно присутствуют CO_2 и H_2O и должно установиться равновесие между пятью составными частями:



Таким образом, необходимо учитывать наличие трех неизвестных – температуры процесса горения $t_{теор}$, коэффициента диссоциации CO_2 – x и коэффициента диссоциации H_2O – y. Этим неизвестным соответствуют следующие уравнения:

$$Q_н^р - Q_{дисс} = t_{теор} \sum V_i c_i ;$$

для реакции $2CO_2 \leftrightarrow 2CO + O_2$

$$\lg K_1 = f_1(t_{теор}); \quad (1)$$

DOI 10.18454/PMI.2016.4.587

для реакции $2H_2O \leftrightarrow 2H_2 + O_2$

$$\lg K_2 = f_2(t_{\text{теор}}). \quad (2)$$

Вычитаем первое уравнение из второго и делим на 2:
для реакции $CO + H_2O \leftrightarrow H_2 + CO_2$

$$\lg K_3 = \frac{\lg K_2 - \lg K_1}{2} = f_3(t_{\text{теор}}). \quad (3)$$

Численные значения констант равновесия K_1 и K_2 определяются по формулам Саккура:

$$\lg K_1 = \frac{29250}{T} - 2{,}5\lg T - 1{,}24; \quad \lg K_2 = \frac{25000}{T} - 2{,}5\lg T + 2{,}68.$$

Придерживаясь главного принципа школы Н.С.Курнакова: «Теоретические вопросы следует изучать на технически важных объектах» [13, 17], в Горном институте был разработан аналитический метод расчета [7], отличающийся от ранее предложенных методов большей точностью, так как отсутствует необходимость построения графиков, по которым сложно определить точное значение температуры. Проиллюстрируем предлагаемый метод расчета теоретической температуры горения на примере генераторного газа.

Константы равновесия реакций (1) и (3) равны:

$$K_1 = \frac{(CO_2)^2}{(CO)^2 O_2} = \frac{(1-x)^2(1+0{,}079x+0{,}046y)}{x^2(0{,}079x+0{,}046y)};$$

$$K_3 = \frac{(CO)(H_2O)}{(CO_2)(H_2)} = \frac{x(1-y)}{(1-x)y}.$$

Воспользуемся методом последовательных приближений для решения системы нелинейных уравнений [3]. Составим систему уравнений, обладающую признаком сходимости, и для упрощения расчетов введем новую величину z:

$$\begin{cases} z = \dfrac{K_1 x^2}{(1-x)^2} = \dfrac{(1+0{,}079x+0{,}046y)}{(0{,}079x+0{,}046y)} \rightarrow x = \dfrac{-z \pm \sqrt{K_1 z}}{(K_1 - z)}; \\ y = \dfrac{x}{K_3(1-x)+x}. \end{cases}$$

Температура равновесия 1600 °С, $\lg K_1 = 1{,}568 \cdot 10^6$ и $\lg K_3 = 6{,}69$.
Принимаем $x = 0{,}02$.
Тогда

$$y = \frac{0{,}02}{6{,}69(1-0{,}02)+0{,}02} = 0{,}003;$$

$$z = \frac{1{,}568 \cdot 10^6 \cdot 0{,}02^2}{(1-0{,}02)^2} = 0{,}5831 \cdot 10^3;$$

$$x = \frac{-0{,}5831 \cdot 10^3 \pm \sqrt{1{,}568 \cdot 10^6 \cdot 0{,}5831 \cdot 10^3}}{(1{,}568 \cdot 10^6 - 0{,}5831 \cdot 10^3)} = 0{,}01892.$$

Принимаем $x = 0{,}01892 \rightarrow y = 0{,}0028713 \rightarrow z = 0{,}6158 \cdot 10^3$.

Аналогичным образом считаем значения x, y и z до тех пор, пока полученные значения не совпадут с заданными. Результаты вычислений приведены в табл.3, в которой также представлены изменения значений x и y по отношению к первоначальному значению.

DOI 10.18454/PMI.2016.4.587

Таблица 3

Результаты вычислений с использованием метода последовательных вычислений

Шаг	x	$\Delta x = x_n - x_{n+1}$	y	$\Delta y = y_n - y_{n+1}$	z
			Температура 1600 °С		
1	0,02000		0,0030000		$0,5831 \cdot 10^3$
2	0,01892	+0,00108	0,0028713	+0,0001287	$0,6158 \cdot 10^3$
3	0,01944	–0,00052	0,0029553	–0,0000840	$0,5992 \cdot 10^3$
4	0,01918	+0,00026	0,0029148	+0,0000405	$0,6074 \cdot 10^3$
5	0,01931	–0,00013	0,0029350	–0,0000202	$0,6033 \cdot 10^3$
6	0,01924	+0,00007	0,0029240	+0,0000110	$0,6054 \cdot 10^3$
7	0,01927	–0,00003	0,0029290	–0,0000050	$0,6045 \cdot 10^3$
			Температура 1633 °С		
1	0,02000		0,0030000		$0,5831 \cdot 10^3$
2	0,02619	–0,00619	0,0038305	–0,0008305	$0,4464 \cdot 10^3$
3	0,02299	+0,00320	0,0033501	+0,0004804	$0,5083 \cdot 10^3$
4	0,02450	–0,00221	0,0035758	–0,0002257	$0,4772 \cdot 10^3$
5	0,02376	+0,00174	0,0034641	+0,0001117	$0,4921 \cdot 10^3$
6	0,02411	–0,00035	0,0035186	–0,0000545	$0,4847 \cdot 10^3$
7	0,02394	+0,00017	0,0034915	+0,0000271	$0,4887 \cdot 10^3$
8	0,02403	–0,00009	0,0035065	–0,0000150	$0,4864 \cdot 10^3$
9	0,02398	+0,00005	0,0034975	+0,0000090	$0,4875 \cdot 10^3$
10	0,02400	–0,00002	0,0035020	–0,0000045	$0,4870 \cdot 10^3$
			Температура 1629 °С		
1	0,02400		0,0035000		$0,4871 \cdot 10^3$
2	0,02308	+0,00082	0,003381	+0,000119	$0,5062 \cdot 10^3$
3	0,02352	–0,00044	0,003449	–0,000068	$0,4967 \cdot 10^3$
4	0,02331	+0,00021	0,003416	+0,000033	$0,5014 \cdot 10^3$
5	0,02341	–0,00010	0,003432	–0,000016	$0,4992 \cdot 10^3$
6	0,02336	+0,00005	0,003425	+0,000007	$0,5001 \cdot 10^3$
7	0,02338	–0,00002	0,003428	–0,000003	$0,4996 \cdot 10^3$
8	0,02337	+0,00001	0,003426	+0,000002	$0,4999 \cdot 10^3$
9	0,02338	–0,00001	0,003426	–0,000000	

Состав ($м^3$) и количество продуктов сгорания (% по объему):

CO_2	0,1592(1 – 0,01927)	0,1561	0,1558
CO	0,1592·0,01927	0,0031	0,0031
H_2O	0,0923(1 – 0,002929)	0,0920	0,0918
H_2	0,0923·0,002929	0,0003	0,0003
O_2	0,079·0,01927 + 0,046·0,002929 + 0,0119	0,0141	0,0136
N_2	0,7352	0,7352	0,7340
SO_2	0,0014	0,0014	0,0014
Итого	1 + 0,079·0,01927 + 0,046·0,002929	1,0017	1

Теплосодержание продуктов горения:

Горение генераторного газа	2728 / 1,0017 = 2723 кДж/$м^3$
Диссоциация CO_2	–3045·4,19·0,0031 = –39,6 кДж/$м^3$
Диссоциация H_2O	–2580·4,19·0,0003 = –3,2 кДж/$м^3$
Итого	i_0 = 2723 – 36,9 – 3,2 = 2680 кДж/$м^3$

Температура при данном теплосодержании

$$t = \frac{i_0}{\sum V_i \overline{c}_i},$$

DOI 10.18454/PMI.2016.4.587

где i_0 – теплосодержание продуктов горения, кДж/м^3; V_i, – объемная доля продукта горения; $\bar{c}_i$ – средняя теплоемкость продукта горения, кДж/(м^3·К).

Подставляем значения теплоемкостей при заданной температуре до тех пор, пока не получится тождество:

$$t_i = \frac{2680}{0{,}1558\bar{c}_{CO_2} + 0{,}7340\bar{c}_{N_2} + 0{,}0136\bar{c}_{O_2} + 0{,}0918\bar{c}_{H_2O} + 0{,}0031\bar{c}_{CO} + 0{,}0003\bar{c}_{H_2} + 0{,}0014\bar{c}_{SO_2}}.$$

Принимаем

$$t_i = 1600\ ^\circ\text{C} \xrightarrow{\text{шаг 1}} 1634\ ^\circ\text{C} \xrightarrow{\text{шаг 2}} 1632\ ^\circ\text{C} \xrightarrow{\text{шаг 3}} 1633\ ^\circ\text{C}.$$

Температура равновесия 1633 °С, lg $K_1 = 0{,}8054 \cdot 10^6$ и lg $K_3 = 7{,}0$.
Принимаем

$$x = 0{,}02 \rightarrow y = 0{,}003 \rightarrow z = 0{,}5831 \cdot 10^3.$$

Состав (м^3) и количество продуктов сгорания (% по объему):

CO_2	0,1592(1-0,02400)	0,1554	0,1558
CO	0,1592·0,02400	0,0038	0,0038
H_2O	0,0923(1-0,003502)	0,0920	0,0918
H_2	0,0923·0,003502	0,0003	0,0003
O_2	0,079·0,02400+0,046·0,003502+0,0119	0,01400	0,0140
N_2	0,7352	0,7352	0,7336
SO_2	0,0014	0,0014	0,0014
Итого	1+0,079·0,02400+0,046·0,003502	1,0021	1

Теплосодержание продуктов горения:

Горение генераторного газа	2728 / 1,0021 = 2722 кДж/м^3
Диссоциация CO_2	–3045·4,19·0,0038 = –48,5 кДж/м^3
Диссоциация H_2O	–2580·4,19·0,0003 = –3,2 кДж/м^3
Итого	i_0 = 2722 – 48,5 – 3,2 = 2676 кДж/м^3

Температура с учетом вычисленного теплосодержания:

$$t_i = \frac{2676}{0{,}1558\bar{c}_{CO_2} + 0{,}7336\bar{c}_{N_2} + 0{,}014\bar{c}_{O_2} + 0{,}0918\bar{c}_{H_2O} + 0{,}0038\bar{c}_{CO} + 0{,}0003\bar{c}_{H_2} + 0{,}0014\bar{c}_{SO_2}}.$$

Принимаем

$$t_i = 1600\ ^\circ\text{C} \xrightarrow{\text{шаг 1}} 1632\ ^\circ\text{C} \xrightarrow{\text{шаг 2}} 1629\ ^\circ\text{C} \xrightarrow{\text{шаг 3}} 1629\ ^\circ\text{C}.$$

Температура равновесия 1629 °С, lg $K_1 = 0{,}872 \cdot 10^6$ и lg $K_3 = 6{,}963$.
Принимаем

$$x = 0{,}024 \rightarrow y = 0{,}0035 \rightarrow z = 0{,}4871 \cdot 10^3.$$

Состав (м^3) и количество продуктов сгорания (% по объему):

CO_2	0,1592(1 – 0,02338)	0,1554	0,1552
CO	0,1592·0,02338	0,0037	0,0037
H_2O	0,0923(1 – 0,003426)	0,0919	0,0918
H_2	0,0923·0,003426	0,0003	0,0003
O_2	0,079·0,02338 + 0,046·0,003426 + 0,0119	0,0139	0,0139
N_2	0,7352	0,7352	0,7337
SO_2	0,0014	0,0014	0,0014
Итого	1 + 0,079·0,02338 + 0,046·0,003426	1,002	1

Теплосодержание продуктов горения:

Горение генераторного газа	2728 / 1,0020 = 2722 кДж/м^3
Диссоциация CO_2	– 3045·4,19·0,0037 = –47,2 кДж/м^3
Диссоциация H_2O	– 2580·4,19·0,0003 = –3,2 кДж/м^3
Итого	i_0 = 2722 – 47,2 – 3,2 = 2672 кДж/м^3

DOI 10.18454/PMI.2016.4.587

Температура с учетом вычисленного теплосодержания:

$$t_i = \frac{2672}{0{,}1552\overline{c}_{CO_2} + 0{,}7337\overline{c}_{N_2} + 0{,}0139\overline{c}_{O_2} + 0{,}0918\overline{c}_{H_2O} + 0{,}0037\overline{c}_{CO} + 0{,}0003\overline{c}_{H_2} + 0{,}0014\overline{c}_{SO_2}}.$$

Принимаем

$$t_i = 1629\ ^\circ\text{C} \xrightarrow{\text{шаг 1}} 1627\ ^\circ\text{C} \xrightarrow{\text{шаг 2}} 1627\ ^\circ\text{C}.$$

Принятая температура 1629 °С и полученная 1627 °С отличаются на 2 °С, что для теплотехнических расчетов вполне достаточно. Таким образом, количество выполненных шагов будет определять точность вычислений.

Выводы

1. С учетом технологических особенностей, месторасположения и инфраструктуры необходимо отметить, что возможное использование углей Канско-Ачинского буроугольного бассейна на переделе спекания относится именно к ОАО «РУСАЛ Ачинск».

2. Приемлемые теплотворность $Q_н^р$=5870 кДж/м^3 и теоретическая температура процесса горения выше 1600 °С генераторного газа при существующем пирометрическом коэффициенте для трубчатых печей позволяют использовать его на переделах спекания шихты и кальцинации глинозема в качестве альтернативы мазуту и природному газу, доступ к которому имеется не во всех регионах.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Борзов А.И.* Перспективы использования бурого угля в производстве глинозема / А.И.Борзов, С.П.Детков, Н.В.Гончаров // Алюминий Сибири – 2003: Сб. научных статей. Красноярск: Бона компани, 2003. С.326-330.

2. *Вайцзеккер Э.* Фактор четыре. Затрат – половина, отдача – двойная / Э.Вайцзеккер, Э.Ловис, Л.Ловис. М.: Akademia, 2000. 341 с.

3. *Виленкин Н.Я.* Метод последовательных приближений. М.: Наука, 1968. 108 с.

4. *Данилов Д.А.* Влияние колебаний зольности каменного угля на процесс спекания нефелиновой руды / Д.А.Данилов, Н.П.Мухин, И.И.Шепелев // Цветные металлы Сибири – 2009: Сб. научных статей / ООО «Версо». Красноярск, 2009. С.155-156.

5. *Демидов Ю.В.* Получение высококонцентрированных водоугольных суспензий из бурых углей Канско-Ачинского бассейна / Ю.В.Демидов, Г.Г.Бруер, С.М.Колесникова // Обзор ЦНИЭИуголь. 1994. 51 с.

6. *Диомидовский Д.А.* Металлургические печи цветной металлургии. М.: Металлургия, 1970. 704 с.

7. *Дубовиков О.А.* Научное наследие академика Николая Семеновича Курнакова // Записки Горного института. 2015. Т.215. С.65-74.

8. *Копытов В.В.* Газификация твердых топлив: ретроспективный обзор, современное состояние дел и перспективы развития // Альтернативная энергетика и экология. 2011. № 6 (98). С.10-13.

9. *Линчевский В.П.* Топливо и его сжигание. М.: Металлургиздат, 1959. 400 с.

10. *Медведев Г.П.* Утилизация пыли электрофильтров печи спекания нефелиновой шихты репульпацией и подачей пульпы вместе с влажной шихтой в печь / Г.П.Медведев, А.Г.Медведев, А.Д.Михнев // Международная конференция-выставка «Алюминий Сибири». КГАЦМиЗ, Красноярск, 11-13 сентября, 2009. С.139-141.

11. Организация дробного сжигания топлива на действующих вращающихся печах кальцинации / Д.В.Финин, Г.В.Теляков, В.Г.Лазарев, С.Е.Софьин, Е.А.Беликов, С.Н.Макаров // Промышленные печи и высокотемпературные реакторы: Сб. докладов семинара. М.: Изд. дом «Руда и металлы», 2006. С.107-110.

12. *Морачевский А.Г.* Академик Николай Семенович Курнаков и его научная школа. СПб: Изд-во Политехнического ун-та, 2010. 99 с.

13. *Равич М.Б.* Упрощенная методика теплотехнических расчетов. М.: Наука, 1966. 416 с.

14. Развитие передела спекания глиноземсодержащих шихт на заводах РУСАЛ / Д.В.Финин, Л.Г.Барбакадзе, А.А.Староверов, Г.В.Телятников // Технико-экономический вестник РУСАЛа // Глиноземное производство. 2007. № 18. С.39-43.

15. Сырьевая конкуренция: проблема глобального масштаба // Металлы Евразии. 2007. № 2. С.88-89.

16. Теплотехнический анализ работы колосникового холодильника ОАО «РУСАЛ Ачинск» / Д.В.Финин, С.Н.Горбачев, М.А.Кравченя, Л.Г.Барбакадзе // Цветные металлы – 2012: Сб. научных статей / ООО «Версо». Красноярск, 2012. С.316-320.

17. *Федоров А.С.* Творцы науки о металле. М.: Наука, 1980. 218 с.

18. *Finin D.V.* Operational Efficiency Evaluation of Rotary Sintering Kilns and Calciners at JSC RUSAL Refineries / D.V.Finin, L.G.Barbakadze, R.F.Nurgaliev, G.V.Teliatnikov, A.P.Panov // 17th International symposium of ICSOBA. Montreal, Canada, 2006. P.302-311.

Авторы: **О.А.Дубовиков,** *д-р техн. наук, профессор, dubovikov_oa@mail.ru* (*Санкт-Петербургский горный университет, Россия*), **В.Н.Бричкин,** *д-р техн. наук, заведующий кафедрой, brichkin52@mail.ru* (*Санкт-Петербургский горный университет, Россия*).

Статья принята к публикации 25.05.2016.