

2. Костина З.И., Крылова С.А., Понурко И.В. К вопросу о способах переработки сидеритовых руд // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований, 2015. №11. – С. 580-582.

3. Савченко И.А., Смирнов А.Н., Турчан М.Ю. Подготовка высокомагнезиальных сидеритов бакальского рудного поля к металлургическому производству методами пиро- и гидрометаллургии // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия», 2016. Т. 16. №3. С. 63 – 69.

4. Пирометаллургическая переработка комплексных руд / Л.И. Леонтьев, Н.А. Ватолин, С.В. Шаврин, Н.С. Шумаков. – М.: Metallurgia, 1997. – 432 с.

5. Шумаков Н.С. Получение металлизированного концентрата из сидеритовых руд Бакальского месторождения // Комплексное использование минерального сырья, 1990. № 4. – С. 52-55.

6. Юрьев Б.П., Гольев В.А., Дудко В.А. Анализ восстановления железа при обжиге сидеритовых руд // Сталь, 2019. №10. – С. 3-6.

7. Юрьев Б.П., Гольцев В.А., Дудко В.А. Изучение процесса термообработки сидеритовой руды в шахтной печи // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экологической информации, 2018. №8. – С. 36- 42.

УДК 621.783.231

**Т. А. Шайдурова, М. Д. Казяев**

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет

имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

## **КОНСТРУКЦИЯ И ТЕПЛОВАЯ РАБОТА КОЛПАКОВЫХ ПЕЧЕЙ ДЛЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ РУЛОНОВ ХОЛОДНОКАТАННОЙ СТАЛИ**

**Аннотация.** Холоднокатанная стальная лента после прокатки сворачивается в рулоны, которые подвергаются рекристаллизационному высокотемпературному отжигу в колпаковых печах. Термическая обработка рулонов осуществляется в защитной атмосфере водорода и азота.

Для этого садка из 2-5 рулонов закрывается герметичным стальным муфелем, под которым циркулирует защитная атмосфера.

Муфель накрывают футерованным нагревательным колпаком, внутренняя поверхность которого разогревается либо с помощью электронагревателей, либо газовыми горелками.

Тепловой режим термообработки формируется технологами и проходит несколько этапов: нагрев садки рулонов до заданной температуры, выдержка для выравнивания температуры по объему рулонов, охлаждение садки под колпаком и муфелем и дальнейшее охлаждение на воздухе.

Электрическая и топливная теплогенерация должны обеспечивать строгое выполнение режима термообработки.

Равномерность нагрева стопы рулонов зависит, прежде всего, от конструкции печи, которая может быть выполнена в одностопном и многостопном вариантах, а также от способа теплообмена в системе: нагревательный колпак – муфель – поверхность рулонов и

осуществляется излучением и конвекцией. Передача теплоты в объеме рулонов осложнена анизотропностью теплофизических свойств свернутых рулонов, которые снижают скорость прохождения теплового потока теплопроводностью с поверхности рулона в его центр. Поэтому изучение равномерности нагрева рулонов, в целях совершенствования температурных и тепловых режимов, должно проводиться при исследованиях на действующей печи конкретной конструкции.

**Ключевые слова:** колпаковая печь, холоднокатанная стальная лента, рулоны, теплогенерация, температурный и тепловой режимы, системы отопления, равномерность нагрева, защитная атмосфера.

**Abstract.** Cold-rolled steel strip after rolling is rolled into coils, which are subjected to high-temperature recrystallization annealing in bell furnaces. Heat treatment of rolls is carried out in a protective atmosphere of hydrogen and nitrogen.

For this, a cage of 2-5 rolls is closed with a sealed steel muffle, under which a protective atmosphere circulates.

The muffle is covered with a lined heating cap, the inner surface of which is heated either by electric heaters or by gas burners.

The thermal regime of heat treatment is formed by the technologists and goes through several stages: heating the charge of the rolls to a predetermined temperature, holding to equalize the temperature over the volume of the rolls, cooling the charge under the bell and muffle, and further cooling in air.

Electric and fuel heat generation must ensure strict implementation of the heat treatment regime.

The uniformity of heating of a stack of rolls depends, first of all, on the design of the furnace, which can be performed in one-stop and multi-stop versions, as well as on the method of heat exchange in the system: heating cap - muffle - surface of rolls and is carried out by radiation and convection. The transfer of heat in the volume of the rolls is complicated by the anisotropy of the thermophysical properties of the rolled rolls, which reduce the rate of passage of the heat flow by thermal conductivity from the surface and the roll to its center. Therefore, the study of the uniformity of heating the rolls, in order to improve the temperature and thermal conditions, should be carried out during research on an operating furnace of a specific design.

**Key words:** Bell furnace, cold-rolled steel strip, coils, heat generation, temperature and thermal conditions, heating systems, heating uniformity, protective atmosphere.

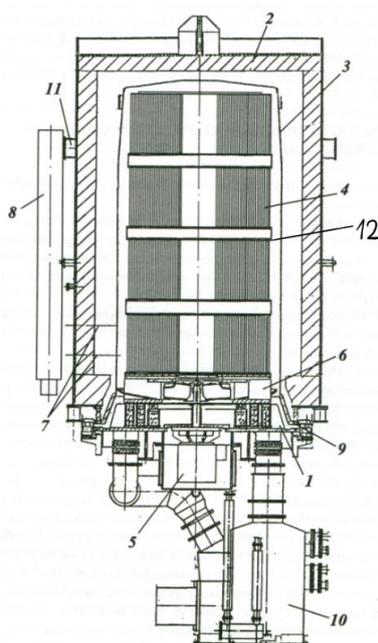
Производство тонкого листа для нужд автомобильной, электротехнической и др. промышленности осуществляется на металлургических заводах на станах холодной прокатки. Получаемая длинная стальная полоса после прокатного стана сворачивается в рулоны.

Ширина ленты на разных предприятиях составляет 0,75...1,5 м, а толщина полосы – 0,2...0,85 мм. Диаметры рулонов – 1,0...2,7 м.

Далее рулоны, после предварительной технологической обработки, поступают в отделение термической обработки с целью проведения рекристаллизационного отжига.

Эта операция термообработки производится в камерных колпаковых печах. В настоящее время на металлургических заводах эксплуатируются одностопные и многостопные колпаковые печи с топливной и электрической теплогенерацией.

На рисунке 1 представлена одностопная колпаковая печь, отапливаемая газом [1].



- 1 – стенд; 2 – нагревательный колпак; 3 – муфель; 4 – стопа рулонов;  
 5 – циркуляционный вентилятор; 6 – направляющий аппарат; 7 – оси горелок;  
 8 – рекуперативно-эжекторное устройство; 9 – резиновое уплотнение;  
 10 – установка охлаждения защитного газа; 11 – отвод продуктов сгорания;  
 12 – конвекторные кольца.

Рис. 1. Одноstopная колпаковая печь с топливной теплогенерацией

Сжигание газа осуществляется горелками, расположенными в нижнем поясе нагревательного колпака. Продукты горения топлива поднимаются вверх в пространстве между колпаком и муфелем и удаляются эжектирующим устройством, расположенным в нижнем или верхнем поясе колпака.

Защитная атмосфера, состоящая из азота и водорода, подается циркуляционным вентилятором в пространство между муфелем и рулонами, и через конвекторные кольца проходит сквозь витки рулонов и в центральный канал.

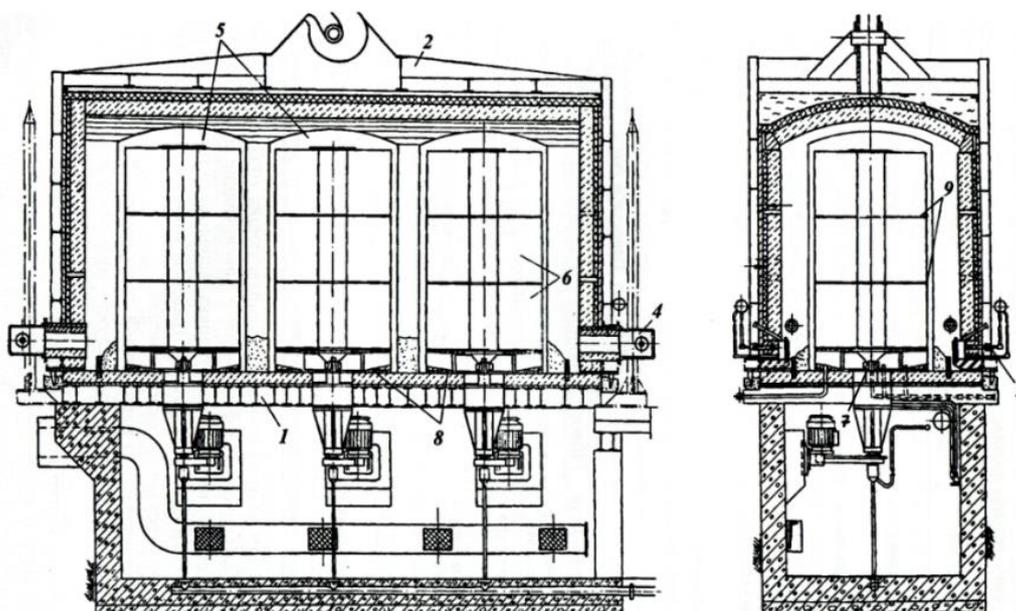
Количество рулонов в стопе может изменяться от двух до пяти в зависимости от их размеров.

Нагревательный колпак футеруют либо огнеупорным и теплоизоляционным стандартным кирпичом, либо специальными блоками из керамоволокнистых материалов.

Одноstopные печи выполняют в виде цилиндрических конструкций.

При высокой производительности станов холодной прокатки листа в цехах устанавливают многостopные колпаковые печи.

На рисунке 2 изображена трехstopная колпаковая печь с топливной тепло генерацией [1, 2].



1 – стенд; 2 – нагревательный колпак; 3 – горелка; 4 – печной эжектор;  
 5 – муфели; 6 – отжигаемые рулоны; 7 – циркуляционный вентилятор  
 с текстропной передачей; 8 – направляющие аппараты  
 циркуляционных вентиляторов; 9 – конвекторные кольца.

Рис. 2. Трёхстопная колпаковая печь для отжига рулонов

Каждая стопа закрыта своим муфелем и имеет индивидуальную циркуляционную систему защитной атмосферы, но обогрев муфелей производится общим нагревательным колпаком. Количество стоп может быть от трех до восьми штук, при этом печи получают соответствующее название: трёх-, четырёх- и многостопные.

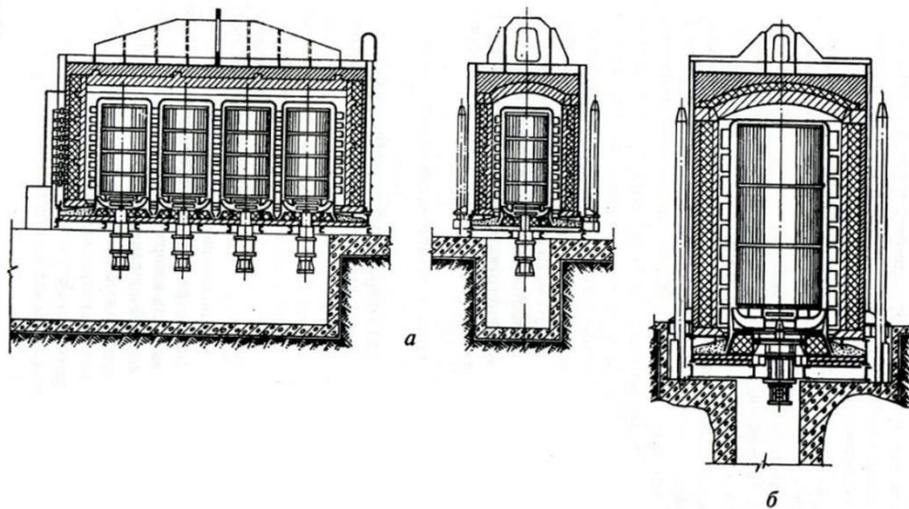
Основанием колпаковой печи является стенд, на котором смонтированы уплотнительные затворы каждого колпака и муфеля, и циркуляционные вентилятора, а под стендом выполнен глубокий приямок, для размещения трубопроводов газа, воздуха, защитной атмосферы и электрооборудования.

Процесс рекристаллизационного отжига рулонов в колпаковой печи занимает большое время вследствие особенности теплообмена между колпаком, муфелем и рулонами при участии защитной атмосферы, обеспечивающей безокислительный нагрев и охлаждение рулонов [3-6].

При наступлении процесса охлаждения рулонов под муфелем, нагревательный колпак некоторое время участвует в этом процессе, а затем его снимают со стенда и горячим переносят на другой стенд, подготовленный к нагреву очередной партии рулонов [7, 8].

Высокотемпературная термообработка рулонов (ВТО) осуществляется в колпаковых печах с электрической теплогенерацией.

На рисунке 3 изображены четырехстопная (а) и одностопная (б) электрические печи [1].



*a* – четырехстопная; *б* – одностопная.

Рис. 3. Электрические колпаковые печи для отжига рулонов

Основные элементы конструкции этих печей такие же, как и у топливных печей.

Источником теплоты являются электронагреватели, смонтированные на внутренних поверхностях нагревательного колпака.

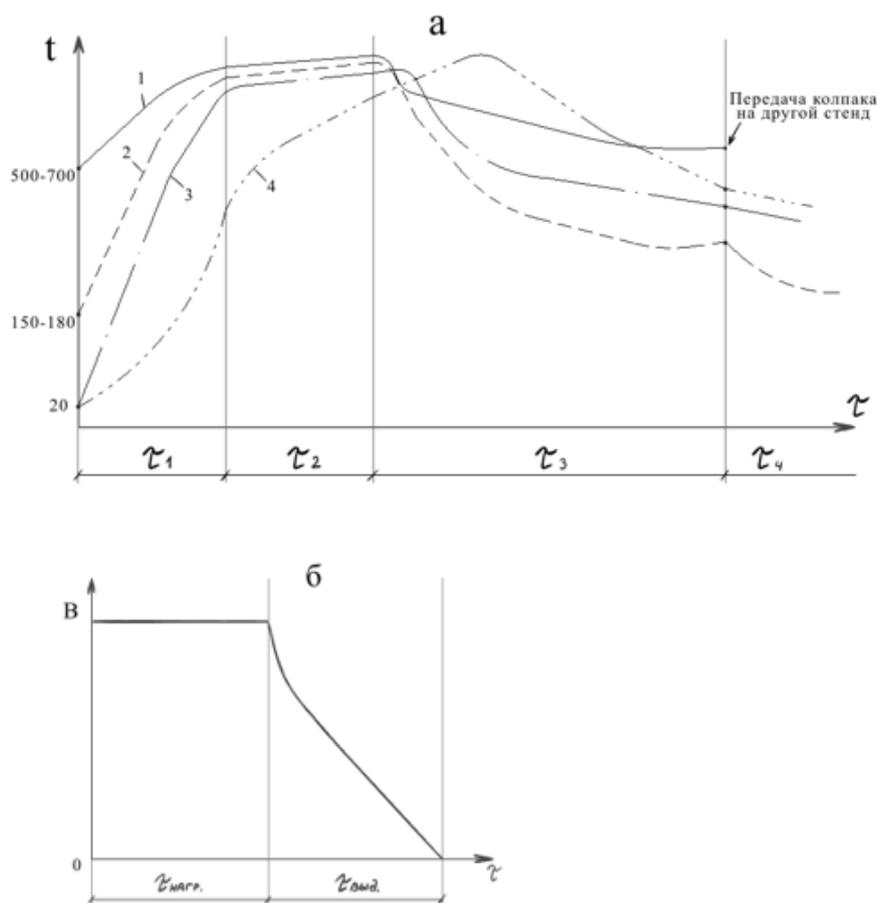
Необходимо отметить, что колпаковые печи относятся к классу камерных печей с изменяющейся рабочей температурой и по режиму загрузки и выдачи продукции работают циклами, а партия рулонов составляет неподвижную садку, поэтому в литературе используют термин «садочные печи».

В то же время, необходимо отметить, что станы холодной прокатки работают непрерывно, и для согласования производительности стана и термоотдела цеха нужно задействовать большое количество колпаковых печей, работающих периодическими циклами [9, 10].

Из всего класса камерных печей с изменяющейся рабочей температурой колпаковые печи являются самыми сложными как в конструктивном плане, так и в организации соответствующей тепловой работы, связанной с длительными периодами нагрева садки и ещё более длительного регламентированного её охлаждения.

Обобщенный режим термообработки садки рулонов в колпаковой печи представлен на рисунке 4, из которого видно, что температуры колпака и муфеля достигают заданного значения за время  $\tau_1$  и далее выдерживаются в течение времени  $\tau_2$ .

Следующий за выдержкой режим охлаждения садки рулонов сначала под колпаком и муфелем, а затем только под муфелем при циркуляции защитной атмосферы занимает значительное время  $\tau_3$ , по истечению которого муфель снимают со стопы рулонов, которые продолжают остывать на воздухе в течение тоже длительного времени  $\tau_4$ . Соотношение времени охлаждения и нагрева садки рулонов в зависимости от режима термообработки может составлять  $\frac{\tau_{\text{охл}}}{\tau_{\text{нагр}}} = 1 \dots 2$  [5, 6].



1 – температура колпака; 2 – температура муфеля; 3 – температура верхнего рулона; 4 – температура нижнего рулона;  $\tau_1$  – время подъема температуры колпака до заданного значения;  $\tau_2$  – время выдержки садки с целью выравнивания температуры в её объеме;  $\tau_3$  – время регламентированного охлаждения садки под колпаком и муфелем;  $\tau_4$  – время охлаждения садки рулонов на воздухе.

Рис. 4. Режим термообработки садки рулонов (а) и тепловой режим (б)

В одностопных колпаковых печах равномерность нагрева выше, чем в многостопных, но последние имеют большую производительность.

Равномерность нагрева рулонов зависит от многих факторов: во-первых, и прежде всего, от положения рулонов в стопе и в целом в садке, во-вторых, – от способа теплогенерации (нагрев рулонов происходит более равномерно в электрических печах, чем в топливных).

Объясняется это тем, что в электрических печах нагреватели размещены равномерно на внутренней поверхности нагревательного колпака.

В топливных печах горелки размещают по периметру нижнего пояса колпака, и сжигание газа осуществляется в нижней части пространства между колпаком и муфелем, а продукты горения поднимаются вверх, обогревая колпак и муфель неравномерно по их высоте. Отвод продуктов сгорания из печи

осуществляется эжекторным устройством, расположенным сосредоточенно в одном месте колпака, что также не способствует равномерности нагрева садки.

Изложенное выше подтверждается исследованиями, проведенными сотрудниками кафедры термообработки и физики металлов УрФУ по нагреву и охлаждению рулонов в электрической колпаковой печи.

На рисунке 5 показан температурный режим нагрева и охлаждения одного из рулонов в трехстопной колпаковой электрической печи.

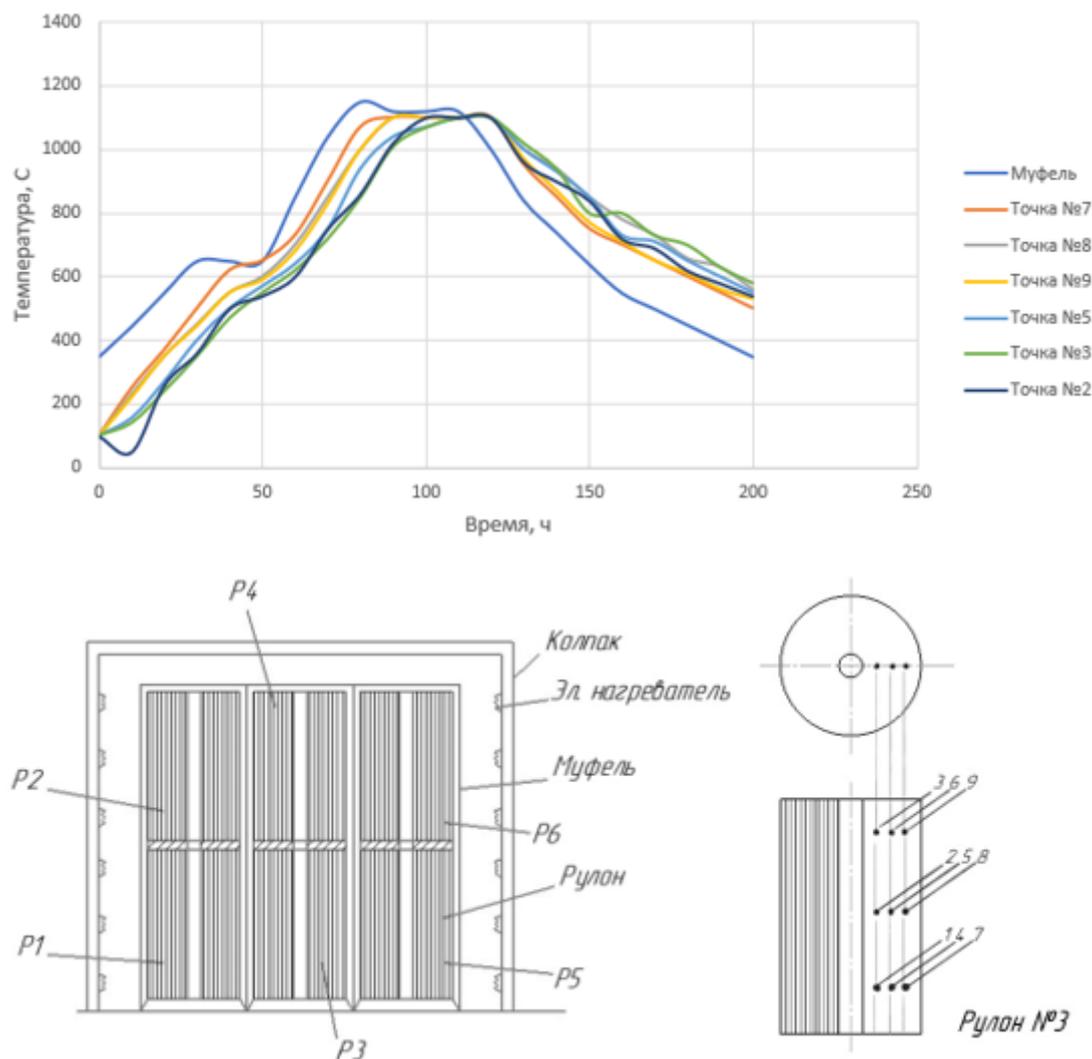


Рис. 5. Режим нагрева и охлаждения рулона №3 в электрической трехстопной колпаковой печи

Рулон №3 находится в центральной стопе в нижнем положении, закрыт муфелем и экранирован от нагревателей другими муфелями соседних стоп, т.е. находится, с точки зрения теплообмена, в самом сложном положении.

При подъеме температуры колпака и муфеля до 650 °С перепад температуры по высоте и радиусу рулона составляет максимально 50 °С, а при нагреве от 650 °С до 1150 °С перепад температуры достигает максимально 200 °С и сокращается до допустимых технологических значений в течение 40-часовой выдержки всей садки при температуре 1120 °С.

Значительные перепады температуры в объеме рулона объясняются его анизотропными теплофизическими свойствами, что препятствует передаче теплоты излучением по радиусу от наружной поверхности рулона к внутренним его виткам, которые нагреваются конвекцией от циркулирующей защитной атмосферы и излучением вдоль стопы.

В заключение следует отметить, что термообработка рулонов в электрических колпаковых печах по сравнению с топливными обходится в 3-5 раз дороже. Но топливные печи, имеющие несовершенную систему отопления, проигрывают электрическим печам по равномерности и длительности тепловой обработки садки рулонов.

В связи с применением в последнее время на нагревательных печах современных рекуперативных горелок, необходимо исследовать и внедрить на колпаковых печах новую совершенную систему газового отопления, обеспечивающую равномерный подвод и отвод продуктов сгорания к колпаку и муфелю, и как следствие, равномерный нагрев садки, подобный нагреву в электрических печах [11].

Решение данного вопроса может быть сформировано после детального компьютерного моделирования газодинамики и теплообмена при движении продуктов сгорания в пространстве между колпаком и муфелем, и защитной атмосферы внутри стопы рулонов.

### **Список использованных источников**

1. Гусовский В.Л., Ладыгичев М.Г., Усачев А.Б. Современные нагревательные и термические печи (конструкции и технические характеристики). Справочник. – М. «Машиностроение», 2001. – 656 с.
2. Кривандин В.А., Егоров А.В. Тепловая работа и конструкции печей черной металлургии. – М. «Металлургия», 1989. – 464 с.
3. Кривандин В.А. Теплотехника металлургического производства / Под научной ред. В.А. Кривандина. Т. II. – М.: МИСИС, 2002. – 735 с.
4. Двейрин Е.Г. Нагрев рулонов стальной ленты в колпаковых печах. – Расчет, проектирование и эксплуатация нагревательных печей: Труды НТО 4М. Т. XXV, 4.1. – М. Metallurgizdat, 1960. – С. 241-254.
5. Двейрин Е.Г. Метод расчета нагрева рулонов стальной ленты в колпаковых печах: сб. трудов // Стальпроект. М.: ЦБТИ Минстрой РСФСР. 1961. Вып. 1. – С. 93-107.
6. Двейрин Е.Г. Метод расчета охлаждения рулонов стальной ленты при отжиге в колпаковых печах: сб. трудов // Стальпроект. М.: Metallurgizdat. Вып. 3. 1963. – С. 78-87.
7. Панфилов В.С., Тулуевский Н.Ю. Реконструкция и расширение отделения колпаковых печей ЦХП Череповецкого металлургического комбината // Сб. «Техническое перевооружение печного хозяйства». – М.: «Металлургия», 1991. – С. 41-50.
8. Гусовский В.Л., Лифшиц А.Е. Методики расчета нагревательных и термических печей. – М. «Теплотехник», 2004. – 296 с.

9. Справочник конструктора печей прокатного производства. Т2 / Под. ред. В.М. Тымчака. – М.: «Металлургия», 1970. – 991 с.

10. Тымчак В.М. Расчет нагревательных и термических печей. Справочник // Под ред. В.М. Тымчака. – М.: «Металлургия», 1983. – 481 с.

11. Вохмяков А.М., Казяев М.Д., Арсеев Б.Н. Комплексная модернизация нагревательных печей // Изв. вузов. Черная металлургия. 2009. №12. – С. 56-59.

УДК 662.613.1

**И. Б. Шестаков, Т. Ф. Богатова**

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет

имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

## **АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА СОРБЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОКСИДА КАЛЬЦИЯ**

**Аннотация.** Рассмотрена возможность использования для минерализации образующегося при сжигании угля диоксида углерода золы тепловых электростанций, содержащей оксиды металлов щелочной группы (CaO, MgO). Проанализированы основные факторы, влияющие на реакционную способность оксида кальция. Показано влияние типа исходного сырья на емкость поглощения углекислого газа оксидом кальция. Изучено влияние температуры, длительности прокаливания и состава дутья на удельную поверхность и размер пор, влияние присутствия CO<sub>2</sub> на эти характеристики. Исследовано влияние условий термической обработки исходного сырья и прокаливания образцов оксида кальция на изменение удельной поверхности и размера пор CaO, определяющих его реакционную способность.

**Ключевые слова:** карбонизация, углекислый газ, оксид кальция, реакционная способность, удельная поверхность.

**Abstract.** The possibility of using ash from thermal power plants containing metal oxides of the alkaline group (CaO, MgO) for mineralization of carbon dioxide formed during coal combustion is considered. The main factors influencing the reactivity of calcium oxide were analyzed. The influence of the type of feedstock on the capacity of carbon dioxide absorption by calcium oxide has been shown. The effect of temperature, duration of calcination and blast composition on the specific surface and pore size and the effect of the presence of CO<sub>2</sub> on these characteristics has been studied. The effect of the conditions of thermal processing of raw materials and calcination of calcium oxide samples on the change in the specific surface area and pore size of CaO, which determine its reactivity, has been studied.

**Key words:** carbonization, carbon dioxide, calcium oxide, reactivity, specific surface area.

В состав образующейся при сжигании углей на тепловых электростанциях золы входят соединения щелочноземельных металлов, например, CaO и MgO. Это позволяет рассматривать золу в качестве сырья для минерализации углекислого газа, образующегося в процессе производства энергии на ТЭС, с образованием устойчивых карбонатов. Состав золы зависит, главным образом, от типа угля, табл. 1 [1].

Реакционная способность материала определяется прежде всего развитостью его реакционной поверхности, на формирование которой влияют