

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА  
ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРОДНОГО  
ТЕРМОАНТРАЦИТА**

© 2012 Слободской С.А., д.т.н.  
(НТУ «ХПИ»)

**Сообщение 1. Влияние режима нагрева  
исходного сырья на свойства термоантрацита**

---

*Приведены результаты исследования температурной зависимости удельного электрического сопротивления антрацитов, положенные в основу разработки и изготовления электропрокалочной печи стадийного нагрева для производства электродного термоантрацита.*



*The article is devoted to the study of the temperature dependence of the electrical resistivity of anthracite, underlying the development and manufacture of the stepwise heating electrical calcination furnace for the production of electrode thermoanthracite.*

Ключевые слова: антрацит, термоантрацит, электросопротивление, прокалка, печь, стадийный нагрев, электродный термоантрацит.

Производство термоантрацита предусматривает термическую обработку (прокалку) антрацитов, в результате которой происходит упорядочение их структуры, повышение плотности, а также тепло- и электропроводности, уменьшение содержания неуглеродных составляющих и изменение других свойств.

Физико-химические требования к качеству различных видов термоантрацита зависят от условий их последующего технологического применения.

К одному из наиболее широко используемых видов углеродных материалов относится электродный термоантрацит для производства электродных, огнеупорных, электроугольных, химически стойких изделий, а также футеровочных блоков и электродной массы. Основным показателем качества электродного термоантрацита является удельное электрическое сопротивление (УЭС), которое в соответствии с нормами стандарта (ГОСТ 4794) не должно превышать  $1000 \times 10^{-6}$  Ом·м.

В отечественной промышленной практике для производства термоантрацита применяют вращающиеся барабанные, ретортные и шахтные печи [1], в которых в качестве теплоносителя используют продукты горения газообразного либо жидкого топлива. Максимальный уровень нагрева антрацита в таких печах не превышает 1100-1200 °С, что затрудняет возможность производства электродного термоантрацита с УЭС заданного качества. Более высокий уровень нагрева до (1300-1350 °С) возможен в печах шахтного типа за счет сжигания части прокаливаемого антрацита. Однако печи этого типа имеют низкую рентабельность, поскольку для производства одной тонны электродного термоантрацита расходуется 2 т исходного сырья. Кроме того, для таких печей характерны сложные условия эксплуатации и высокий уровень загрязнения окружающей среды.

Особый интерес представляет опыт прокаливания антрацитов в электропрокалочных печах за счет выделения тепла при протекании тока через проводник, роль которого выполняет нагреваемый материал. Количество выделяющегося тепла  $G$  определяется из уравнения:

$$G = I^2 \cdot r \cdot t,$$

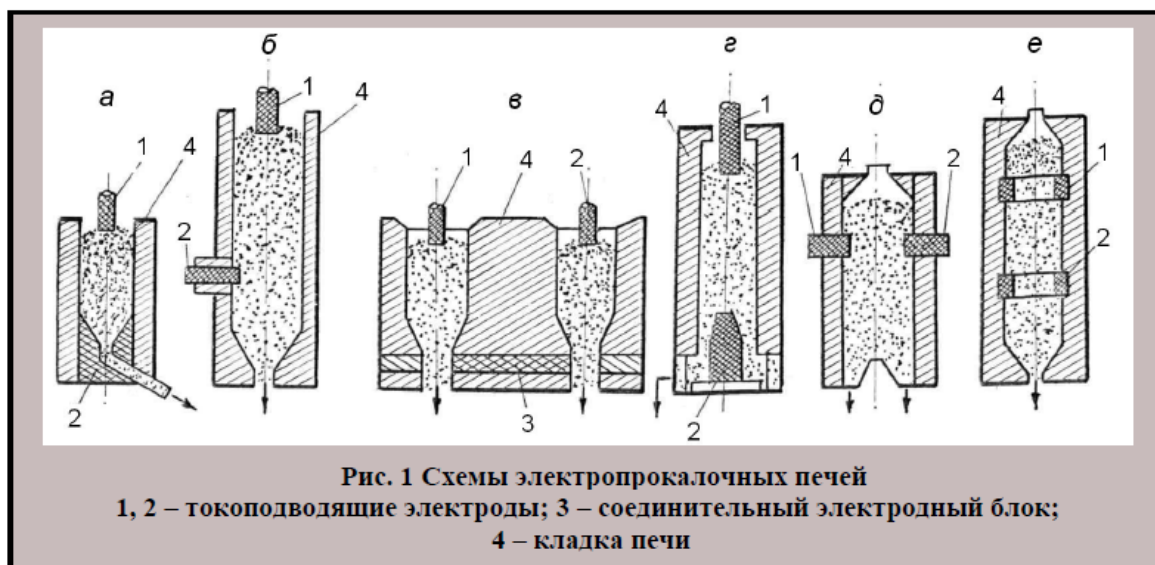
где  $I$  – ток, протекающий по материалу;

$r$  – активное сопротивление материала;

$t$  – продолжительность нагрева.

Принцип электронагрева обеспечивает выделение большого количества тепла, а конечные температуры нагрева ограничиваются лишь теплостойкостью применяемых огнеупорных материалов. Конструкции печей просты, при строительстве не требуют больших капитальных затрат, могут быть подвергнуты полной автоматизации.

Действующие печи выполнены в виде шахт открытого либо закрытого типа с различным способом ввода токоподводящих электродов. Основные типы электропрокалочных печей [2] схематически изображены на рис. 1.



В отечественной практике для приготовления электродной массы применяется открытая электрическая печь с подвесным электродом (рис. 1, а). Высота печи составляет 2,5 м, внутренний диаметр шахты – 1860 мм. Внизу шахта переходит в конический под из обожженной электродной массы, который служит вторым токоподводящим электродом.

Открытая электрическая печь США и Канады (рис. 1, б) с подвесным электродом отличается расположением второго электрода в боковой стенке шахты. Диаметр шахты – 700 мм, расстояние между электродами – 4,0-4,5 м.

Разработанная в Польше открытая прокалочная печь выполнена в виде двух реторт с подвесными электродами (рис. 1, в). Углеродистые блоки в нижней зоне печи обеспечивают прохождение тока между ретортами. Высота реторт – 2,4 м, диаметр подвесных электродов – 475 мм.

В открытой электропрокалочной печи России «ИЭТ – 10» и фирмы «Элкем», Норвегия (рис. 1, г) токоподводящие электроды расположены вдоль вертикальной

оси шахты. Высота печи – 6 м, диаметр – 1930 мм.

К наиболее удачной конструкции печей сопротивления для прокаливания антрацитов можно отнести закрытые печи Японии и Кореи (рис. 1, д). Шахта печи в сечении имеет размеры 3000×740 мм. Электроды введены в кладку со стороны большей оси. Сверху печь оборудована загрузочным устройством и трубопроводом для отвода летучих продуктов термической обработки сырья.

В закрытой электрической печи (рис. 1, е) предусмотрен подвод тока к электродам в окнах кладки на двух уровнях по высоте печи. Количество электродов на каждом уровне может быть различным. Возможно их выполнение в виде сплошных угольных колец.

К числу крупных недостатков электропрокалочных печей относят неравномерность прокаливания, наличие значительного угара и частичную графитацию материала [3]. Это объясняется применяемым способом подвода электроэнергии, при котором вся необходимая мощность для нагрева материала приложена к одной паре электродов, введенных в шахту печи. Например, как отмечено в [4],

электрический ток в печи ИЭТ-10 (рис. 2) протекает по «шнур», соединяющему два электрода. Высокая плотность тока в зоне «шнура» приводит к образованию дугового разряда с температурой более 3000 °С, которая резко снижается в близлежащих участках и составляет не более 800-900 °С на периферии. В результате, в целевом продукте находится как непрокаленный до режимной температуры продукт, так и до 30-40 % сграфитченного термоантрацита.

Отмеченные недостатки действующих прокалочных печей различных типов обусловили необходимость определения оптимальных технологических требований производства термоантрацита заданного качества и разработку конструкции прокалочной печи, обеспечивающей их выполнение.

Был проведен комплекс исследований зависимости УЭС антрацитов от условий их термообработки. Для исследований использованы антрациты Донбасса, характеристика которых приведена в табл. 1.

Выбор принятых для исследований антрацитов был обусловлен существенным различием значений их удельного электросопротивления.

Термическую обработку проб антрацитов проводили в высокотемпературной печи сопротивления (рис. 3) с цилиндрическим графитовым нагревателем 1. Пробу помещали в графитовую реторту 2 и нагревали в инертной среде аргона. Измерение температуры до 800 °С осуществляли термопарой 3 с милливольтметром 4; более

высокий уровень нагрева контролировали оптическим пирометром. Реторту после термической обработки антрацита вытаскивали в водяной холодильник 5 графитовым поршнем 6 за счет повышения расхода инертного газа.

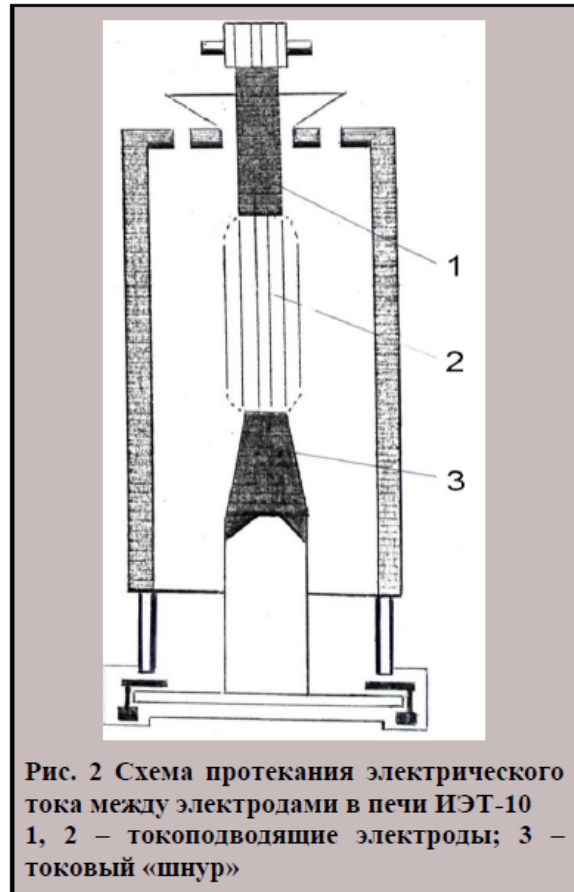


Рис. 2 Схема протекания электрического тока между электродами в печи ИЭТ-10 1, 2 – токоподводящие электроды; 3 – токовый «шнур»

Таблица 1

Удельное электрическое сопротивление антрацитов

№ п/п	Предприятие	УЭС × 10 <sup>-6</sup> Ом·м
1	Шахта имени Володарского	22590
2	ЦОФ «Кураховская»	352508
3	ГОФ «Маяк»	521500



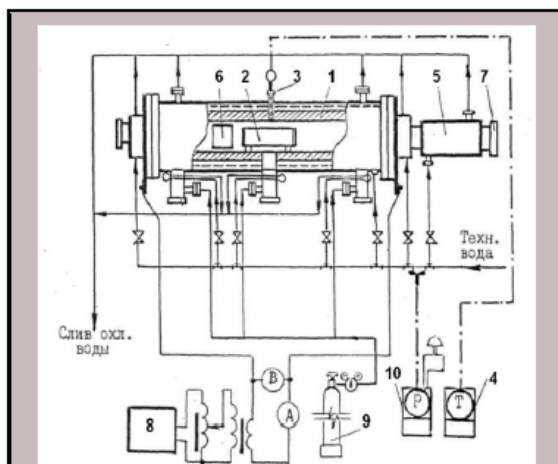


Рис. 3 Схема установки высокотемпературного нагрева антрацитов:

- 1 – графитовый нагреватель; 2 – реторта;
- 3 – термopара; 4 – милливольтметр;
- 5 – холодильник; 6 – поршень;
- 7 – смотровой канал;
- 8 – блок электропитания;
- 9 – баллон с инертным газом;
- 10 – сигнализатор давления воды

Предварительно проведенные исследования показали, что скорость подъема температуры нагрева образцов антрацита не существенно влияет на уровень изменения УЭС. Поэтому скорость нагрева была принята равной 10 °С/мин. Конечная температура нагрева составляла 2000 °С с изотермической выдержкой 0; 2; 4 ч.

В табл. 2 приведены значения УЭС антрацитов в зависимости от температуры их нагрева и продолжительности выдержки при конечных температурах. Видно, что независимо от различающихся значений УЭС исходных антрацитов, после нагрева их до 1200 °С сопротивление снижается и приобретает близкие значения. Нагрев антрацитов выше 1200 °С сопровождается дальнейшим снижением УЭС.

Следует отметить, что при нагреве антрацитов выше 1000-1200 °С темп снижения УЭС резко уменьшается. Действительно, при нагреве антрацитов ГОФ «Маяк» до 1200 °С УЭС снижается от 521500 до  $1267 \times 10^{-6}$  Ом·м, т.е. примерно в 400 раз, в то время как при дальнейшем нагреве до 2000 °С УЭС уменьшается всего в 1,12 раза и составляет  $955 \times 10^{-6}$  Ом·м. Аналогичный характер изменения удельного электрического сопротивления наблюдается и для других исследованных антрацитов.

Исследования показали, что в ходе нагрева антрацитов можно выделить ряд стадий с различной скоростью изменения УЭС. В табл. 3 приведены результаты термообработки проб антрацитов с изотермической выдержкой 2 ч в стендовой электропрокалочной печи. Видно, что численные значения удельного электросопротивления становятся практически равными на 1-й стадии их нагрева (до 1000 °С), а темп снижения УЭС при этом максимален и достигает  $519 \times 10^{-6}$  Ом·м/°С.

На второй стадии нагрева (до 1300 °С) темп снижения УЭС резко уменьшается до  $3,0 \times 10^{-6}$  Ом·м/°С для всех антрацитов. На третьей стадии термообработки (до 1600 °С) изменение электрического сопротивления антрацитов незначительно, а скорость снижения этого параметра составляет всего  $(0,4 \div 0,6) \times 10^{-6}$  Ом·м/°С.

Отмеченный характер изменения электросопротивления антрацитов определил принцип разработки конструкции электропрокалочной печи [5], в которой стадийность режима термообработки антрацитов обеспечен вводом в шахту печи четырех пар токоподводящих электродов. Опытнo-промышленная печь и основные узлы технологии стадийной прокалки антрацитов изготовлены в экспериментальном производстве УХИНа. Схематическое изображение электропечи приведено на рис. 4.

Таблица 2

## Зависимость УЭС антрацитов от температуры нагрева

№ п/п	Конечная температура, °С	Выдержка, ч	УЭС×10 <sup>-6</sup> Ом·м антрацита		
			шахта им. Володарского	ЦОФ «Кураховская»	ГОФ «Маяк»
1	1200	0	1214	1237	1267
2	1400		1072	1073	1043
3	1600		1023	949	945
4	1800		812	909	912
5	2000		821	876	955
6	1200	2	1130	1078	1155
7	1400		983	953	1033
8	1600		841	915	941
9	1800		750	909	906
10	2000		783	900	942
11	1200	4	1000	1068	1041
12	1400		942	948	962
13	1600		855	902	926
14	1800		-	885	902
15	2000		778	870	965

Таблица 3

## Характер зависимости УЭС антрацитов от температуры нагрева в условиях стендовых испытаний

№ пробы антрацита	Исходное значение	УЭС × 10 <sup>-6</sup> Ом·м			Скорость снижения электросопротивления на стадиях термообработки, ×10 <sup>-6</sup> Ом·м/°С		
		Стадия термообработки (конечная температура нагрева, °С)			I	II	III
		I (1000)	II (1300)	III (1600)			
1	22000	1920	1030	930	20	~ 3,0	0,6
2	352000	1940	1045	900	350	~ 3,0	0,5
3	521000	1945	1050	940	519	~ 3,0	0,4

При движении антрацита крупностью 6-13 либо 13-25 мм по шахте печи, на первой стадии нагрева – до 1000 °С – происходит формирование структуры термоантрацита. На второй стадии электронагрев осуществляется с учетом вновь приобретенных материалом свойств и температура его повышается до 1300 °С. Процесс заканчивается при температурах 1500-1600 °С. Предварительное охлаждение термоантрацита до 600-700 °С

происходит в зоне, ограниченной нижней парой токоподводящих электродов и водяным кольцевым холодильником. Полное охлаждение термоантрацита проходит в основном водяном холодильнике, из которого материал попадает в разгрузочное устройство, включающее: толкатель с кривошипным механизмом, редуктором и электроприводом; два разделительных шлюза, служащих для

герметизации печи и приемный бункер термоантрацита.

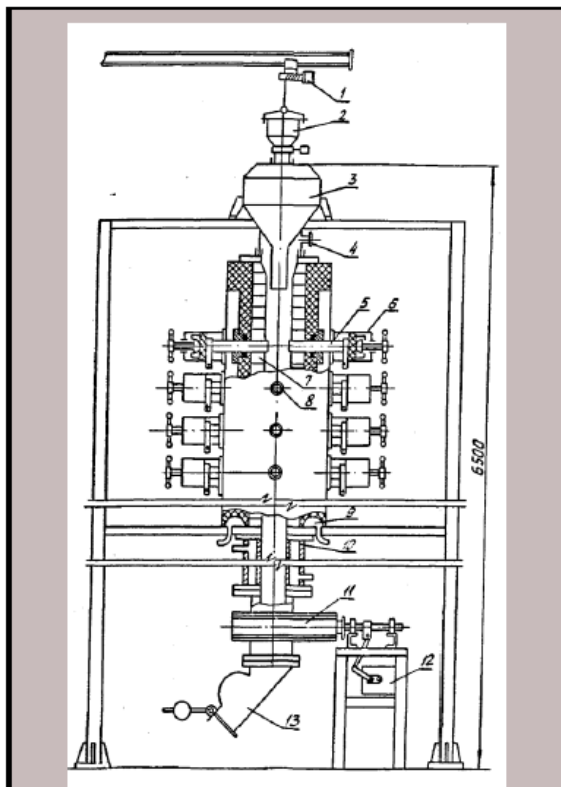


Рис. 4 Электропечь для стадийной прокалки антрацитов:

- 1 – тельфер; 2 – съемный бункер;
- 3 – бункер-накопитель; 4 – газоотвод;
- 5 – электрод; 6 – узел токоподвода;
- 7 – кладка печи; 8 – термопара;
- 9, 10 – водяные холодильники;
- 11 – узел разгрузки; 12 – электропривод;
- 13 – приемный бункер

При выгрузке прокаленного материала толкатель, выполняющий также роль затвора шахты печи, уходит в крайнее положение, открывая шахту, и материал из водяного холодильника перемещается на под разгрузочной камеры. При движении в исходное положение толкатель передает дозу

термоантрацита в первый разделительный шлюз; дальнейшая разгрузка материала осуществляется с помощью шиберов. Выдача каждой очередной дозы термоантрацита приводит к продвижению всей массы материала в шахте печи и к подаче исходного антрацита из загрузочного бункера на прокалку. Таким образом обеспечивается самопроизвольный режим загрузки и регулирование постоянного уровня материала в печи.

По результатам эксплуатации опытно-промышленной печи рекомендованы два варианта режима нагрева антрацитов. В первом варианте нагрев до 1000 °С, обеспечивающим формирование структуры термоантрацита, проходит в зоне первых по ходу антрацита токоподводящих электродов за счет тепла газов термообработки; на второй стадии – в зоне третьей пары токоподводящих электродов и на третьей стадии – в зоне четвертой пары токоподводящих электродов.

Во втором варианте указанный режим трехстадийного нагрева обеспечивается, соответственно, в зонах первых трех пар токоподводящих электродов при сохранении достигнутой температуры в зоне четвертой пары электродов. Это позволило вести нагрев с изотермической выдержкой 0,5 ч при конечной температуре.

Для оценки качества термоантрацита, полученного при различных уровнях термообработки антрацитов, отбирали пробы готового продукта общей массой не менее 15 кг при непрерывной работе установки. Результаты определения свойств отобранных проб термоантрацита показаны в табл. 4.

Приведенные данные характеризуют глубокую степень прокалки материала, что подтверждается достигнутым уровнем УЭС, а также результатами оценки выхода летучих веществ, истинной плотности и механических свойств полученных термоантрацитов. О высокой равномерности уровня термообработки антрацита свидетельствуют результаты измерения УЭС проб термоантрацита,

отобранных в течение многих смен работы установки. В табл. 5. приведены данные измерения УЭС термоантрацита в течение одной из смен. Действительно, отклонение от среднего значения УЭС –  $761,8 \times 10^{-6}$  Ом·м только в некоторых случаях составляет  $(18-19) \times 10^{-6}$  Ом·м, что лишь незначительно

превышает допустимое расхождение между результатами параллельных измерений этого показателя по стандартной методике ( $13 \times 10^{-6}$  Ом·м). В большинстве же случаев это расхождение значительно ниже допустимого и лежит в пределах  $(1,8-8,2) \times 10^{-6}$  Ом·м.

Таблица 4

Характеристика термоантрацитов, полученных при различных вариантах трехстадийного нагрева

Режим нагрева	Выдержка при конечной температуре, мин	Конечная температура нагрева, °С	Показатели качества продукта					
			$V^{daf}$ , %	$St^d$ , %	$dr^d$ , г/см <sup>3</sup>	твердость, МПа	структурная прочность, %	УЭС $\times 10^{-6}$ Ом·м
Отсутствие (исходный антрацит)	–	–	1,80	0,78	1,6192	20	92,2	450000
Вариант 1	0	1500	0,68	0,77	1,8290	126	84,3	969 – 956
		1600	0,55	0,72	1,8315	127	82,5	870 – 854
Вариант 2	30	1500	0,46	0,68	1,8420	130	82,0	915 – 898
		1600	0,23	0,65	1,8551	129	82,0	753 – 754

Таблица 5

Характеристика степени термообработки антрацита по результатам измерения УЭС

№ пробы	УЭС $\times 10^{-6}$ Ом·м	Отклонение от среднего значения $761,8 \times 10^{-6}$ Ом·м
1	768	+6,2
2	760	-1,8
3	780	+18,2
4	760	-1,8
5	760	-1,8
6	770	+8,2
7	780	+18,2
8	755	-6,8
9	760	-1,8
10	765	+3,2
11	742	-19,8
12	742	-19,8

Выход сграфиченного термоантрацита полностью отсутствовал, а полученный продукт с характерным металлическим блеском не имел признаков его окисления.

Режим электропитания после достижения заданных температур процесса характеризовался высокой стабильностью и при установленном напряжении 35-40 В и силе



тока 150-180 А практически не требовал вмешательства оператора в технологический процесс.

О технических преимуществах разработанного процесса получения термоантрацита свидетельствуют сопоставительные данные, приведенные в табл. 6.

Таблица 6

Сравнительная характеристика электропрокалочных печей

Тип электропечи	Температура нагрева антрацита, °С		УЭС термоантрацита $\times 10^{-6}$ Ом·м		Выход сграфиченного материала, %	Расход электроэнергии, кВт·ч/т
	среднее значение	макс. отклонение от средн. значения	среднее значение	макс. отклонение от средн. значения		
ИЭТ-10	1500	+1500 -600	900	+7000 -400	> 30,0	1000
Печь стадийного нагрева	1500	$\pm 50$	750	$\pm 25$	отс.	700

Общий вид опытно-промышленной печи стадийной электропрокалки антрацитов показан на рис. 5.

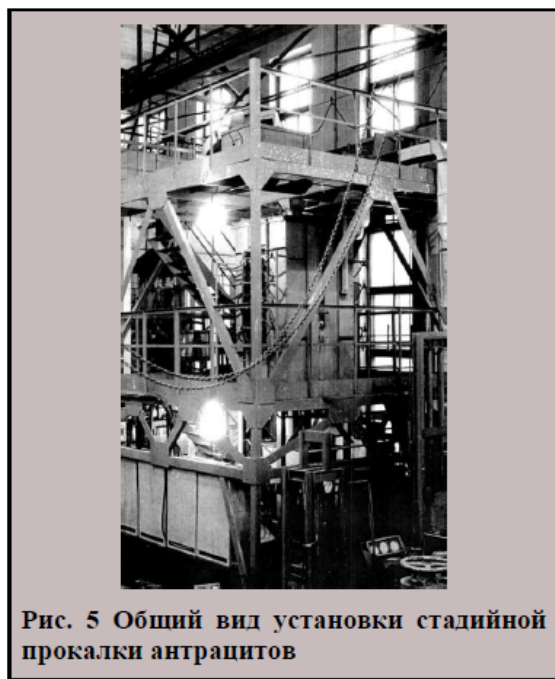


Рис. 5 Общий вид установки стадийной прокалки антрацитов

Следует отметить, что достигнутое сочетание стабильного температурного режима, высокого качества и равномерности свойств термоантрацита с УЭС, равным  $750 \pm 25 \times 10^{-6}$  Ом·м невозможно обеспечить в современных действующих печах производства электродного термоантрацита.

#### Библиографический список

1. Чалых Е.Ф. Технология и оборудование электродных и электроугольных предприятий / Евгений Федорович Чалых. – М.: Металлургия, 1972. – 432 с.
2. Чалых Е.Ф. Прокалочные печи электродной промышленности / Евгений Федорович Чалых. – М.: ЦНИИИнформации, 1963. – 65 с.
3. Темкин И.В. Производство электродных изделий / Исаак Вульфович Темкин. – М.: Высшая школа, 1975. – 232 с.
4. Солдатов А.И. Электрокальцинированный антрацит. Особенности его производства и применения: автореф. дис. на соискание научн. степени канд. техн. наук : спец. 05.17.07 «Химическая технология

топлива и газа» / Александр Иванович Станислав Александрович Слободской //  
Солдатов. – Харьков: УХИН, 1991. – 25 с. Изобретения – 1988. – № 34. – С. 10.

5. А.С. 1423577 СССР, МКИ С 10 L 9/08.

Способ получения термоантрацита / Рукопись поступила в редакцию 18.01.2012