

УДК 537.311.3:622.335

**В.А. Безуглый**, мл. науч. сотр., e-mail: vbez@i.ua**М.В. Губинский**, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой промышленной теплоэнергетики, e-mail: gubinmv@ukr.net**А.С. Коверя**, канд. техн. наук, доц., e-mail: nakover13@gmail.com**В.П. Коноваленко**, канд. техн. наук, зав. лаб. кафедры электрометаллургии**П.В. Кондратенко**, ассистент кафедры термической обработки металлов

Национальная металлургическая академия Украины, Днепр, Украина

## Экспериментальное исследование удельного электрического сопротивления насыпного слоя термоантрацита

В статье приведены результаты экспериментального исследования удельного электрического сопротивления насыпного слоя донецкого антрацита класса крупности 25–6 мм при его термической обработке в диапазоне температур 800–1600 °С и при давлении в слое в диапазоне 2–62 кПа.

Эффективным инструментом, используемым для усовершенствования электрокальцинаторов, является компьютерное моделирование. Важным является использование в модели достоверных исходных данных, в частности, зависимости удельного электрического сопротивления насыпного слоя термоантрацита от температуры и давления в слое.

Удельное электрическое сопротивление насыпного слоя кускового углеродистого материала, в частности термоантрацита, зависит от его гранулометрического состава, температуры и давления в слое. Известные зависимости для удельного электрического сопротивления насыпного слоя противоречат друг другу в части характера его изменения с изменением фракционного размера термоантрацита. Поэтому возникла практическая необходимость дополнительного исследования удельного электрического сопротивления насыпного слоя термоантрацита.

Исследовался прокаленный донецкий антрацит фракции 25–6 мм, который наиболее часто используется в электрокальцинаторах Украины.

Экспериментально установлено, что значение температуры обработки антрацита, при которой удельное электрическое сопротивление слоя достаточно для начала эффективного электрического нагрева, даже при минимальном давлении в слое, составляет 950 °С.

Вид аппроксимирующей зависимости удельного электрического сопротивления насыпного слоя исследуемого термоантрацита от давления в слое является логарифмической с высоким коэффициентом детерминации.

Получена аппроксимирующая зависимость удельного электрического сопротивления насыпного слоя исследуемого термоантрацита от температуры обработки в диапазоне 1000–1600 °С и давления в слое в диапазоне 2–62 кПа, которая в дальнейшем будет использована для проведения компьютерного моделирования работы электрокальцинаторов.

**Ключевые слова:** термоантрацит, электрокальцинатор, удельное электрическое сопротивление, насыпной слой, давление в слое, контактное электрическое сопротивление.

**Введение.** Антрацит, прошедший термическую обработку без доступа воздуха при высоких температурах – термоантрацит – получил широкое применение в черной и цветной металлургии. В результате воздействия высоких температур из ископаемого антрацита удаляются влага и летучие компоненты, увеличивается истинная плотность и значительно уменьшается удельное электрическое сопротивление (УЭС), что является важным для дальнейшего его использования при изготовлении электродов.

Мировой объем производства термоантрацита составляет примерно 20 миллионов тонн ежегодно [1].

Для производства термоантрацита используются печи различных типов: электрические, шахтные, роторные, барабанные вращающиеся и другие [1].

Для получения термоантрацита высшего сорта [2], который используется при изготовлении электродов

и электродной массы, применяются исключительно электрические печи прямого нагрева – электрокальцинаторы. Только печи данного типа позволяют получить температуры обработки более 1500 °С, которые необходимы по технологическим требованиям.

К недостаткам существующих конструкций электрокальцинаторов можно отнести значительный расход электроэнергии, значительную неоднородность свойств термоантрацита и его значительный угар.

Для усовершенствования существующих конструкций электрокальцинаторов, а также для разработки новых, широко используется компьютерное моделирование [3–5]. Его результатом является распределение температуры, тепловых потоков, электрического потенциала и плотности тока в рабочем объеме.

Как правило, программы компьютерного моделирования реализуют метод конечных элементов, с помощью которого решаются связанные тепловая и

электрическая задачи. Для получения достоверных результатов необходимым условием является использование точных входных данных относительно физических, тепловых и электрических свойств термоантрацита: насыпной плотности, эффективной теплоемкости, коэффициента эффективной теплопроводности, УЭС насыпного слоя. Первые три параметра являются довольно точно установленными. Наиболее сложным для определения является УЭС насыпного слоя термоантрацита, который в общем виде зависит от размеров кусков, температуры и давления в слое.

**Анализ публикаций.** Экспериментально было установлено [6], что при прохождении электрического тока через слой термоантрацита основная часть тепла выделяется в зоне контактов его кусков. То есть, задействован электроконтактный механизм нагрева, а не искро-дуговой [7, 8].

Также экспериментально [9] установлена важная особенность термоантрацита – явление электро-контактной памяти. С увеличением усилия в контактной паре термоантрацит-металл или термоантрацит-термоантрацит электрическое сопротивление контакта уменьшается. Однако, при снятии усилия или его уменьшении, значение электрического сопротивления остается неизменным и равняется сопротивлению при максимальном усилии на сжатие. Это явление можно объяснить структурными особенностями термоантрацита. Известно, что термоантрацит является хрупким материалом. При увеличении усилия на сжатие в зоне контакта происходит механическое разрушение материала термоантрацита. Это приводит к увеличению площади контакта, что, в свою очередь, приводит к снижению контактного электрического сопротивления. А при уменьшении усилия или его снятии площадь контакта и, соответственно, электрическое сопротивление остаются постоянными.

Исходя из теории электрических контактов Хольма [10] в работах [11–13] аналитически и экспериментально получены зависимости УЭС насыпного слоя термоантрацита от гранулометрического состава, давления в слое и внутреннего УЭС, который, в свою очередь, зависит от температуры.

Однако, в ряде работ [14–18] были получены экспериментальные данные, которые противоречат результатам исследований [11–13] в части характера зависимости УЭС насыпного слоя термоантрацита от гранулометрического состава.

Таким образом, анализ публикаций, касающихся установления зависимости УЭС насыпного слоя термоантрацита от гранулометрического состава,

температуры и давления в слое, показывает необходимость дальнейшего исследования этого вопроса, имеющего важное практическое значение.

**Постановка задачи.** В электрокальцинаторах, которые эксплуатируются в Украине, в основном, термообработку проходит антрацит Донецкого угольного бассейна класса крупности 25–6 мм, что обеспечивает достаточную газопроницаемость слоя с одной стороны и равномерность прокаливания кусков антрацита – с другой. Поэтому важной задачей является исследование УЭС слоя термоантрацита, полученного путем термической обработки именно донецкого антрацита данного класса крупности.

Существенные физико-химические превращения в антраците, которые влияют на изменение УЭС, начинаются с температуры более 800 °С. Поэтому начальная температура обработки антрацита при проведении исследования УЭС выбирается равной 800 °С, а максимальная – в 1600 °С, исходя из условий эксплуатации действующих электрокальцинаторов.

Высота рабочего объема электрокальцинаторов не превышает 6 метров, при насыпной плотности термоантрацита класса крупности 25–6 мм около 1000 кг/м<sup>3</sup>. Поэтому максимальное давление в слое термоантрацита наблюдается в самом низу печи и составляет не более 60 кПа.

Измерение УЭС слоя термоантрацита при высокой температуре реализовать технически крайне сложно. Поэтому исследование целесообразно проводить при его комнатной температуре с использованием предварительно прокаленного при разных температурах антрацита.

**Целью данной работы** является экспериментальное исследование УЭС насыпного слоя донецкого антрацита класса крупности 25–6 мм при его термической обработке в диапазоне температур 800–1600 °С и при давлении в слое до 62 кПа. Также важной задачей является получение аппроксимирующей зависимости УЭС насыпного слоя термоантрацита от температуры обработки и давления в слое, которая в дальнейшем будет использована для проведения компьютерного моделирования работы электрокальцинаторов.

**Объект и методика исследования.** Для исследования была отобрана проба антрацита класса крупности 25–6 мм из партии рядового антрацита, добытого на одной из шахт Донецкого угольного бассейна.

Был проведен технический анализ подготовленной пробы антрацита, результаты которого приведены в табл. 1.

Таблица 1

## Технический анализ исследуемого антрацита

Параметр	Обозначение	Единица	Значение	ГОСТ
Влага аналитической пробы	$W^e$	%	3,8	11014–2001
Зольность на сухое состояние	$A^d$	%	5,3	11022–95
Выход летучих веществ на горючее состояние	$V^{daf}$	%	6,9	6382–2001

Результаты технического анализа показывают, что изучаемый антрацит является довольно характерным для антрацитов Донецкого угольного бассейна.

Антрацит был прокален при температурах: 800, 900, 950, 1000 и 1600 градусов Цельсия при изотермической выдержке 2 ч. После этого он был постепенно охлажден до комнатной температуры.

Прокалка антрацита до температур 1000 °С производилась в шахтной электрической печи, а до температур 1600 °С – в печи Таммана. При этом термоантрацит, который прокаливался до температур 1600 °С, предварительно подвергался термообработке в шахтной электрической печи до температуры 1000 °С, а потом охлаждался до комнатной температуры.

Измерение УЭС слоя антрацита/термоантрацита производилось с помощью экспериментальной установки (рис. 1, 2), которая состоит из матрицы 1, заполненной антрацитом/термоантрацитом, разрывной машины 2, источника постоянного тока 3, амперметра 4 и вольтметра 5.

Для создания сжимающих усилий использовалась разрывная машина типа FPZ-100/1.

Для обеспечения постоянным током силой до 1 А использовался источник питания типа ТЕС 13.

Для измерения силы тока и падения напряжения использовались два цифровых мультиметра.

Экспериментальная установка работает следующим образом. В матрицу 1 загружается антрацит/термоантрацит. Матрица устанавливается в разрывную машину 2, после чего включается источник постоянного тока 3 и фиксируются показания амперметра 4 и вольтметра 5. Начинает работу разрывная машина, которая создает сжимающие усилия и дополнительно фиксируются показания динамометра.

Матрица (рис. 3) состоит из пластикового цилиндрического корпуса 1, в середине которого находится антрацит/термоантрацит 2, верхнего подвижного медного электрода 3, верхнего токоподвода 4, верхнего изолятора 5, нижнего неподвижного медного электрода 6, который фиксируется в корпусе при помощи четырех болтов 7, нижнего токоподвода 8 и нижнего изолятора 9.

Площадь поперечного сечения засыпки антрацита/термоантрацита составляла 100 см<sup>2</sup>. Максимальный объем засыпки внутри матрицы был 2 дм<sup>3</sup>.

Для каждой пробы антрацита/термоантрацита определение УЭС проводилось последовательно три раза. Каждый раз перед засыпкой в матрицу материал тщательно перемешивался.

Для каждой пробы антрацита/термоантрацита дополнительно измерялось УЭС по ГОСТ 4668-75.

Обработка экспериментальных данных выполнялась в пакетах MS Excel и TableCurve 3D.

**Результаты исследования.** График изменения УЭС слоя антрацита/термоантрацита в зависимости от давления и его аппроксимирующие зависимости приведены на рис. 4–9.

Аппроксимирующая зависимость УЭС слоя антрацита/термоантрацита в диапазоне температур 1000–1600 °С и давления 2–62 кПа приведены на рис. 10.

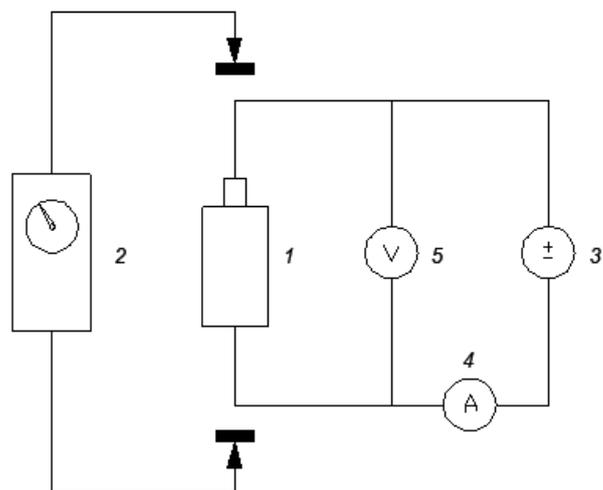


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для определения УЭС: 1 – матрица; 2 – разрывная машина; 3 – источник питания; 4 – амперметр; 5 – вольтметр



Рис. 2. Общий вид экспериментальной установки для определения УЭС

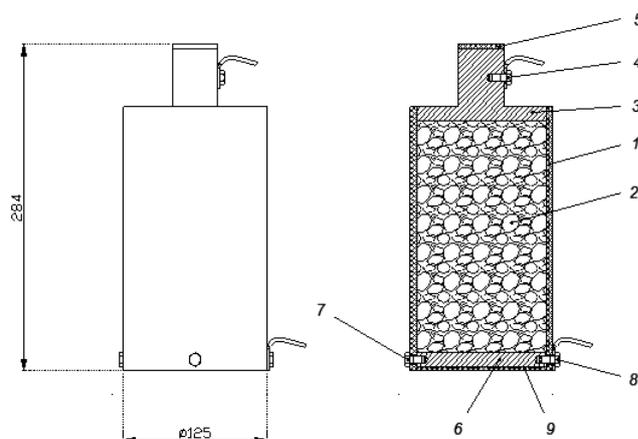
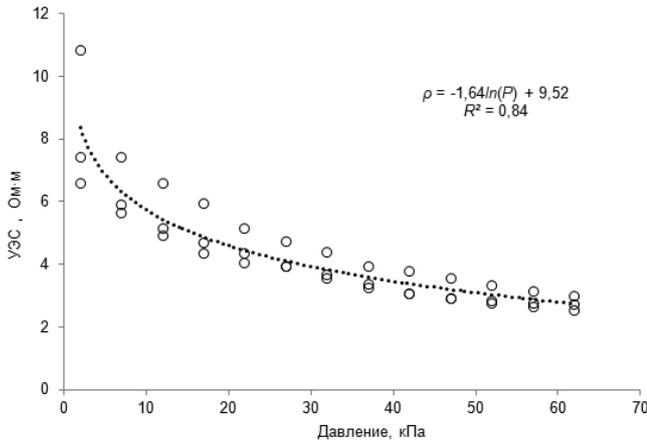


Рис. 3. Схема матрицы: 1 – корпус; 2 – антрацит/термоантрацит; 3 – верхний электрод; 4 – верхний токоподвод; 5 – верхний изолятор; 6 – нижний электрод; 7 – болт; 8 – нижний токоподвод; 9 – нижний изолятор

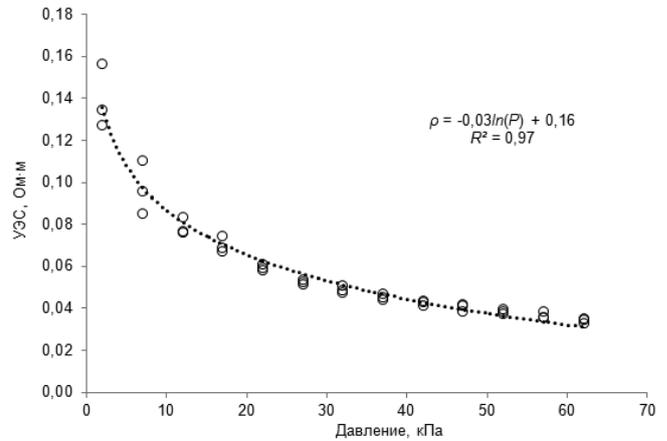
Значения УЭС антрацита/термоантрацита, определенные по ГОСТ 4668-75, приведены в табл. 2.

**Обсуждение результатов исследования.** Полученные экспериментальные данные показывают,

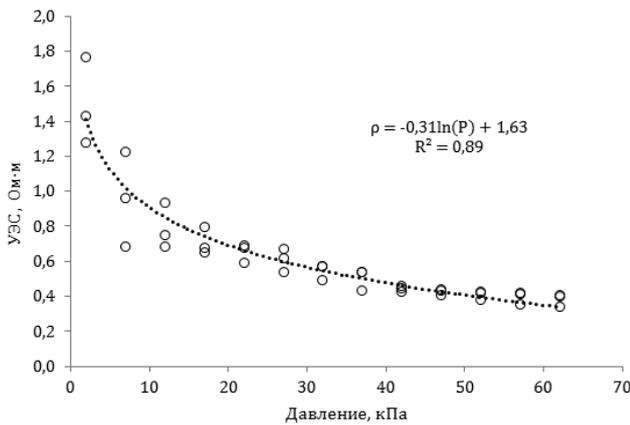
что термическая обработка антрацита в диапазоне температур в 800–1000 °С приводит к стремительно уменьшению УЭС его насыпного слоя при одинаковом давлении в слое. Это согласуется с данными, которые ранее были получены другими авторами



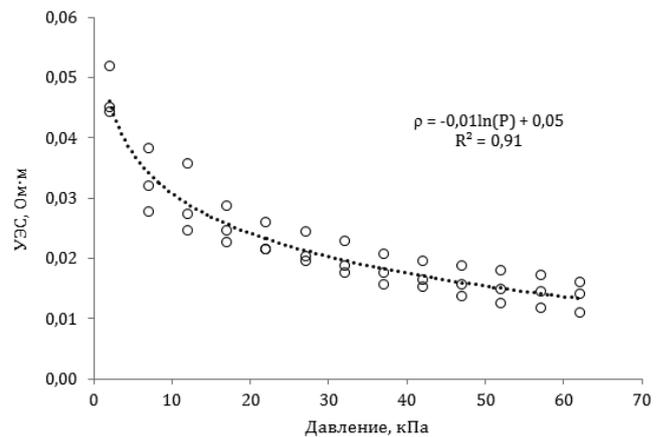
**Рис. 4.** График зависимости УЭС слоя от давления для исходного антрацита



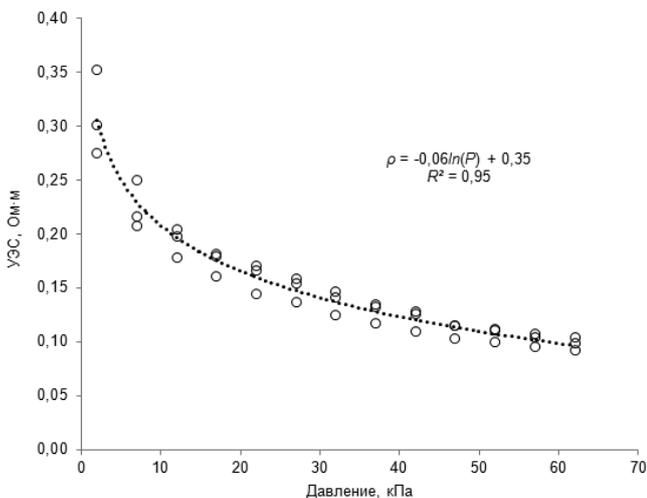
**Рис. 7.** График зависимости УЭС слоя от давления для термоантрацита, термически обработанного при температуре 950 °С



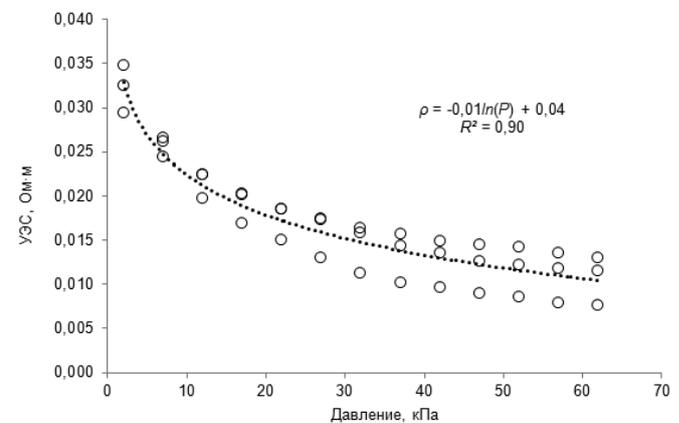
**Рис. 5.** График зависимости УЭС слоя от давления для термоантрацита, термически обработанного при температуре 800 °С



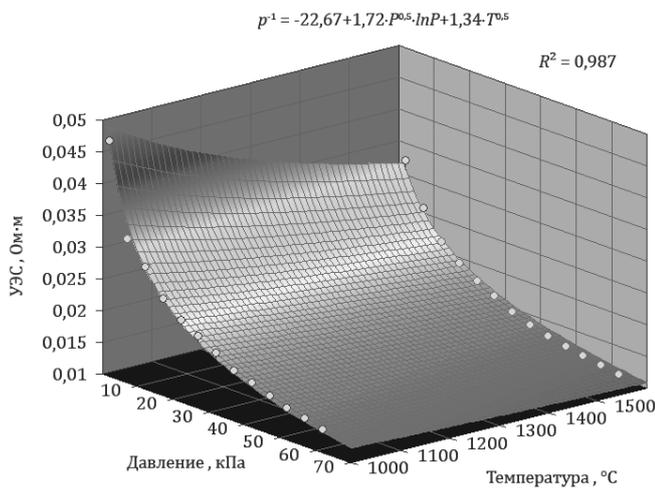
**Рис. 8.** График зависимости УЭС слоя от давления для термоантрацита, термически обработанного при температуре 1000 °С



**Рис. 6.** График зависимости УЭС слоя от давления для термоантрацита, термически обработанного при температуре 900 °С



**Рис. 9.** График зависимости УЭС слоя от давления для термоантрацита, термически обработанного при температуре 1600 °С



**Рис. 10.** Аппроксимирующая поверхность зависимости УЭС слоя термоантрацита от температуры и давления

**Таблица 2**

**Значение УЭС антрацита/термоантрацита, измеренное по ГОСТ 4668-75**

Температура, °С	20	800	900	950	1000	1600
УЭС, мкОм·м	493125	23334	3334	2834	1750	1090

относительно резкого снижения УЭС термоантрацита в компактном виде и УЭС, измеренного по ГОСТ 4668-75 в данном температурном диапазоне. Уменьшение УЭС насыпного слоя может быть объяснено как структурными изменениями в самом материале при прокатке, так и уменьшением электрического сопротивления контактов между его кусками. С практической точки зрения, важным является то, что при температуре термообработки антрацита в 950 °С, даже при минимальном давлении в слое, УЭС его насыпного слоя является достаточным для эффективного электрического нагрева в действующих электрокальцинаторах.

Из полученных результатов также видно, что при увеличении давления в слое антрацита/термоантрацита УЭС слоя уменьшается, что согласуется с данными, которые ранее были получены другими авторами, в частности, относительно кокса. Увеличение давления в слое антрацита/термоантрацита с 2 до 62 кПа приводит к уменьшению УЭС слоя в 3–4 раза, что может быть объяснено увеличением площади контактов между кусками. Аппроксимирующие зависимости УЭС слоя от давления для каждой порции

исследуемого материала являются логарифмическими с коэффициентом детерминации более 0,8.

Максимальное среднеарифметическое относительное отклонение от среднеарифметического значения УЭС слоя антрацита/термоантрацита между тремя независимыми измерениями составляет не более 20 %. По мнению авторов статьи, это позволяет распространить полученные результаты на значительный объем засыпки обрабатываемого материала, который характерен для условий действующих электрокальцинаторов.

Для дальнейшего практического использования в математическом моделировании работы электрокальцинаторов была получена аппроксимирующая зависимость УЭС слоя термоантрацита от температуры обработки в диапазоне 1000–1600 °С и давления в слое в диапазоне 2–62 кПа с коэффициентом детерминации более 0,98.

## Выводы

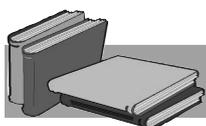
Экспериментально исследовано УЭС насыпного слоя антрацита Донецкого угольного бассейна класса крупности 25–6 мм при его термической обработке в диапазоне температур 800–1600 °С и при давлении в слое в диапазоне 2–62 кПа.

Аппроксимирующие зависимости УЭС слоя в зависимости от давления имеют логарифмический вид, что подтверждает данные предыдущих исследований.

В диапазоне температур обработки в 800–1000 °С наблюдается резкое снижение УЭС насыпного слоя термоантрацита. Такой же характер имеет изменение УЭС, измеренное по ГОСТ 4668-75. Это согласуется с данными предыдущих исследований, как относительно характера изменения УЭС по ГОСТ 4668-75, так и характера изменения внутреннего УЭС термоантрацитов.

Полученные экспериментальные данные позволили непосредственно установить, что УЭС насыпного слоя донецкого антрацита класса крупности 25–6 мм, начиная с температуры его обработки в 950 °С, является достаточным для начала его эффективного электрического нагрева в условиях существующих электрокальцинаторов.

На основе экспериментальных данных была получена аппроксимирующая зависимость для УЭС насыпного слоя донецкого антрацита от температуры обработки и давления в слое, которая в дальнейшем будет использована для проведения компьютерного моделирования работы электрокальцинаторов.

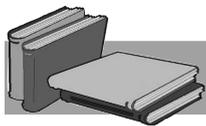


## ЛИТЕРАТУРА

1. Петров Б.Ф. Энергосбережение в производстве электродного термоантрацита: монография. Київ: «Екотехнологія», 2006. 144 с.
2. ГОСТ 4794-97. Термоантрацит электродный. Технические условия. Минск, 2000. 4 с.

3. Perron J., Bouvette J.-F., Dupuis M. Optimization of Anthracite Calcination Process in a Vertical Electric Arc Furnace. *Light Metals*. 1996. P. 597–602.
4. Gasik M.M., Gasik M.I., Urazlina O.Yu., Kutuzov S.V. Modeling and Optimisation of Anthracite Treatment in an Electrocalcinator. *The Twelfth International Ferrous Congress, June 6–9, 2010, Helsinki, Finland*. P. 339–347.
5. Лакомский В.И., Пальти А.М., Юрченко Д.Д. Компьютерное моделирование тепловых и электрических процессов в электрокальцинаторе. *Современная электрометаллургия*. 2011. № 2. С. 44–49.
6. Лакомский В.И., Григоренко Г.М. Особенности нагрева термоантрацита в электрическом поле переменного тока. *Современная электрометаллургия*. 2004. № 3. С. 53–55.
7. Bernard J.C., Bassart J.L., Lacroix S. Electrical calcination anthracite. *A new technology: Proc. Session 116 AIME, Annual Meeting. Light Metals*. 1987. P. 581–587.
8. Rui R.T., Hachette R., Simard G. et al. Computer simulation of the anthracite calcining furnace. *Ibid*. 1999. P. 609–616.
9. Лакомський В.Й. Явище електроконтактної пам'яті термоантрациту. *Доповіді НАН України*. 2008. № 12. С. 88–91.
10. Хольм Р. Электрические контакты. М.: ИЛ, 1961. 464 с.
11. Лакомский В.И., Лебедев В.А. Зависимость контактного электрического сопротивления термоантрацита от температуры и давления. *Современная электрометаллургия*. 2004. № 4. С. 46–48.
12. Лакомский В.И., Цыбулькин Г.А. Аналитическая модель удельного сопротивления электропроводного сыпучего материала. *Современная электрометаллургия*. 2005. № 1. С. 46–49.
13. Быковец В.В., Лакомский В.И., Кириленко В.П. Удельное электрическое сопротивление кускового термоантрацита в тонком слое. *Современная электрометаллургия*. 2004. № 1. С. 47–49.
14. Скрипченко Г.Б. Изменение структуры и свойств антрацитов Донбасса при термической обработке. *Химия твердого топлива*. 2010. № 4. С. 3–13.
15. Чирка Т.В. Теплопровідність та електропровідність сипучих вуглецевих матеріалів: автореферат дисертації кандидата технічних наук. Національний технічний університет України – «КПІ», Київ, 2013. 20 с.
16. Вархалев В.Ю., Вархалев Ю.П., Горда В.И., Тесленко А.И. Экспериментальная проверка математической модели определения электрического сопротивления насыпного материала как нагревательного элемента в энергетических установках. *Научные труды Донецкого национального технического университета – Электротехника и энергетика*. 2007. Выпуск 7. С. 245–248.
17. Белозеров А.А. Зависимость удельной электрической проводимости гетерогенных систем от физических свойств составляющих фаз и давления: автореферат диссертации кандидата технических наук. Санкт-Петербургский государственный технологический институт, Санкт-Петербург, 2010. 163 с.
18. Домбровский Ю.М., Степанов М.С., Бровер Г.И. Оценка электропроводности порошковых углеродных карбюризаторов. *Научные труды Донецкого национального технического университета – Технические науки*. 2011. Выпуск 10. С. 1780–1784.

Поступила 23.06.2019



## REFERENCES

1. Petrov, B.F. (2006). Energy saving in the thermoanthracite production for electrodes: monograph. Kyiv: Ecotechnology, 144 p. [in Russian].
2. GOST 4794-97. Thermoanthracite for electrodes. Specifications. Minsk, 2000, 4 p. [in Russian].
3. Perron, J., Bouvette, J.-F., Dupuis, M. (1996). Optimization of Anthracite Calcination Process in a Vertical Electric Arc Furnace. *Light Metals*, pp. 597–602 [in English].
4. Gasik, M.M., Gasik, M.I., Urazlina, O.Yu., Kutuzov, S.V. (2010). Modeling and Optimisation of Anthracite Treatment in an Electrocalcinator. *The Twelfth International Ferrous Congress, June 6–9, 2010, Helsinki, Finland*, pp. 339–347 [in English].
5. Lakomskiy, V.I., Palti, A.M., Yurchenko, D.D. (2011). Computer simulation of thermal and electrical processes in the electric calciner. *Advances in Electrometallurgy*, no. 2, pp. 44–49 [in Russian].
6. Lakomskiy, V.I., Grigorenko, G.M. (2004). Features of the thermoanthracite heating in an alternating current electric field. *Advances in Electrometallurgy*, no. 3, pp. 53–55 [in Russian].
7. Bernard, J.C., Bassart, J.L., Lacroix, S. (1987). Electrical calcination anthracite. A new technology: Proc. Session 116 AIME, Annual Meeting. *Light Metals*, pp. 581–587 [in English].
8. Rui, R.T., Hachette, R., Simard, G. et al. (1999). Computer simulation of the anthracite calcining furnace. *Ibid*, pp. 609–616 [in English].
9. Lakomskiy, V.Y. (2008). The phenomenon of electrocontact memory of thermoanthracite. *Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine*, no. 12, pp. 88–91 [in Ukrainian].
10. Holm, R. (1961). Electrical contacts. Moscow: IL, 464 p. [in Russian].
11. Lakomskiy, V.I., Lebedev, V.A. (2004). Dependence of the contact electrical resistance of thermoanthracite on temperature and pressure. *Advances in Electrometallurgy*, no. 4, pp. 46–48 [in Russian].
12. Lakomskiy, V.I., Tsybulkin, G.A. (2005). Analytical model of the specific resistivity for electrically conductive bulk material. *Advances in Electrometallurgy*, no. 1, pp. 46–49 [in Russian].
13. Bykovets, V.V., Lakomskiy, V.I., Kirilenko, V.P. (2004). The specific electrical resistance of lumpy thermoanthracite for a thin layer. *Advances in Electrometallurgy*, no. 1, pp. 47–49 [in Russian].
14. Skripchenko, G.B. (2010). Structure changes and properties of Donbass anthracite during heat treatment. *Solid Fuel Chemistry*, no. 4, pp. 3–13 [in Russian].

15. Chirka, T.V. (2013). Thermal conductivity and electrical conductivity of bulk carbon materials: the author abstract for the candidate of technical sciences. National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, 20 p. [in Ukrainian].
16. Varkhalev, V.Yu., Varkhalev, Yu.P., Gorda, V.I., Teslenko, A.I. (2007). Experimental validation of a mathematical model for determining the electrical resistance of bulk material as a heating element in power facilities. *Scientific works of Donetsk National Technical University. Electrical Engineering and Energy*. Issue 7, pp. 245–248 [in Russian].
17. Belozherov, A.A. (2010). Dependence of the specific electrical conductivity of heterogeneous systems on the physical properties of the constituent phases and pressure: the author abstract for the candidate of technical sciences. St. Petersburg State Institute of Technology, St. Petersburg, 163 p. [in Russian].
18. Dombrovskiy, Yu.M., Stepanov, M.S., Brover, G.I. (2011). Evaluation of the electrical conductivity of carbon cementing powder. *Scientific works of Donetsk National Technical University. Technical science*. Issue 10, pp. 1780–1784 [in Russian].

Received 23.06.2019

**Анотація**

**В.А. Безуглий**, мол. наук. співр., e-mail: vbez@i.ua; **М.В. Губинський**, д-р техн. наук, проф., зав. кафедри промислової теплоенергетики, e-mail: gubinmv@ukr.net; **А.С. Коверя**, канд. техн. наук, доц., e-mail: nakover13@gmail.com; **В.П. Коноваленко**, канд. техн. наук, зав. лаб. кафедри електрометалургії; **П.В. Кондратенко**, асистент кафедри термічної обробки металів

*Національна металургійна академія України, Дніпро, Україна*

**Експериментальне дослідження питомого електричного опору насипного шару термоантрациту**

В статті наведено результати експериментального дослідження питомого електричного опору насипного шару донецького антрациту класу крупності 25–6 мм при його термічній обробці в діапазоні температур 800–1600 °С та тиску у шарі в діапазоні 2–62 кПа.

Ефективним інструментом, який використовується для удосконалення електрокальцинаторів, є комп'ютерне моделювання. Важливим є використання у моделі достовірних вихідних даних, зокрема, залежності питомого електричного опору насипного шару термоантрациту від температури та тиску у шарі.

Питомий електричний опір насипного шару кускового вуглецевого матеріалу, зокрема термоантрациту, залежить від гранулометричного складу, температури та тиску у шарі. Відомі залежності для питомого електричного опору насипного шару суперечать одна одній у частині характеру його зміни зі зміною фракційного розміру термоантрациту. Тому виникла практична необхідність додаткового вивчення питомого електричного опору насипного шару термоантрациту. Вивчався прожарений донецький антрацит фракції 25–6 мм, який найбільш часто використовується в електрокальцинаторах України.

Експериментально встановлено, що значення температури обробки антрациту, за якої питомий електричний опір шару достатній для початку ефективного електричного нагріву, навіть за мінімального тиску у шарі, складає 950 °С.

Апроксимуюча залежність питомого електричного опору насипного шару досліджуваного термоантрациту від тиску у шарі є логарифмічною з високим коефіцієнтом детермінації.

Отримано апроксимуючу залежність питомого електричного опору насипного шару досліджуваного термоантрациту від температури обробки в діапазоні 1000–1600 °С та тиску у шарі в діапазоні 2–62 кПа, котра в подальшому буде використана для проведення комп'ютерного моделювання роботи електрокальцинаторів.

**Ключові слова**

*Термоантрацит, електрокальцинатор, питомий електричний опір, насипний шар, тиск у шарі, контактний електричний опір.*

**Summary**

**V.A. Bezugly**, Junior Researcher, e-mail: vbez@i.ua; **M.V. Gubynskiy**, Dr. Sci. (Engin.), Professor, Head of the Department of Industrial Power System, e-mail: gubinmv@ukr.net; **A.S. Koveria**, PhD (Engin.), Associate Professor, e-mail: nakover13@gmail.com; **V.P. Konovalenko**, PhD (Engin.), Head of the Laboratory of Department of Electrometallurgy;  
**P.V. Kondratenko**, Assistant of the Department of Heat Treatment of Metals  
*National Metallurgical Academy of Ukraine, Dnipro, Ukraine*

**Experimental study of the specific electrical resistance of the thermoanthracite bulk layer**

*The studies of the specific electrical resistance of the Donetsk anthracite bulk layer with the size of 25–6 mm under its thermal treatment in the temperatures of 800–1600 °C and at the pressures in the layer of 2–62 kPa have been presented.*

*An effective tool used to improve electric calciners is computer modelling. It is important to use reliable input data for the model, in particular, the dependence of the specific electrical resistance of the thermoanthracite bulk layer on temperature and pressure in the layer.*

*The specific electrical resistance of the bulk layer of lumpy carbonaceous material, in particular, thermoanthracite, depends on its particle size distribution, temperature and pressure in the layer. The known dependencies for the specific electrical resistance of the bulk layer contradict each other in terms of the nature of its change with the change in the fractional size of thermoanthracite. In regard to the above mentioned there is a practical need for additional studies of the specific electrical resistance of the thermoanthracite bulk layer.*

*The calcined Donetsk anthracite with fraction of 25–6 mm is most frequently used in electric calciners of Ukraine, was studied in this paper.*

*Experiments proved that the temperature treatment of the anthracite, at which the sufficient specific electrical resistance of the layer to start effective electrical heating, is 950 °C, even with a minimum pressure in the layer.*

*The type of approximating dependence of the specific electrical resistance of the thermoanthracite bulk layer on the pressure in the layer is logarithmic with the high coefficient of determination.*

*An approximating dependency of the specific electrical resistance of the thermoanthracite bulk layer on the temperature treatment of 800–1600 °C and pressure in the layer of 2–62 kPa has been obtained, and it will be used later for computer modelling of the electric calciners.*

**Keywords**

*Thermoanthracite, electric calciner, specific electrical resistance, bulk layer, layer pressure, contact electrical resistance.*