

Губинский М.В. /д.т.н./, Федоров С.С. /к.т.н./,

Ливитан Н.В. /к.т.н./

НМетАУ

Гогоци А.Г.

Центр материаловедения

Барсуков И.В. /к.т.н./

Компания Американские Энергетические
Технологии

Упендра Рохатхи /к.т.н./

Брукхевенская национальная Лаборатория

Анализ энергетической эффективности печей для высокотемпературной термической обработки углеродных материалов

Выполнен анализ эффективности высокотемпературной обработки углеродных материалов в электропечах плотного и кипящего слоя. Приведены удельные затраты электроэнергии для печей различных типов и основные направления по совершенствованию их тепловой работы. Определены гидродинамические режимы работы печей электротермического кипящего слоя, обеспечивающие равномерный нагрев материала. Ил. 4. Табл. 2. Библиогр.: 7 назв.

Ключевые слова: углеродный материал, высокотемпературная обработка, кальцинатор, электротермический кипящий слой

The paper analyses efficiency of high temperature treatment of carbon materials in electric furnaces with dense and fluidized beds. The specific power consumption for furnaces of different types and the main guidelines for improving their thermal operation are given. Hydrodynamic working modes of the furnaces with dense and fluidized beds ensuring consistent heating of material are determined.

Keywords: carbon material, high temperature treatment, calcinator, electrothermal fluidized bed

Качество металлургической продукции напрямую зависит от характеристик применяемых шихтовых и расходных, в том числе, и углеродных, материалов. Например, это характерно для процессов получения алюминия, где на 1 т продукции в электролизерах расходуется 450–500 кг анодов, а также в электросталеплавильном производстве при потреблении графитированных электродов 4,5–10 кг на 1 т электростали [1]. Таким образом, повышение качества расходных углеродных материалов непосредственно влияет на совершенствование металлургических технологий, что объясняет значительный интерес металлургов к агрегатам и процессам подготовки углеродных материалов [2, 3].

Основными тенденциями развития производства углеродных материалов являются повышение их качества, в первую очередь, за счет повышения чистоты самих материалов, а также разработка и внедрение энергоэффективных методов их термической обработки [4].

Сырьем для производства углеграфитовых изделий являются кокс, антрацит и природный графит. Суть технологического процесса сводится к нагреву исходного материала до температуры 2000–2700 °С с последующей выдержкой, в процессе которой наблюдается частичная графитизация сырья, удаление серы, летучих продуктов, металлов и их оксидов, входящих в состав золы.

Известные печные агрегаты для высокотемпературной обработки углеродных материалов с использованием внешнего нагрева (газового и электрического) [4] обеспечивают термическую обработку сырья до

температуры не более 900–1400 °С. При этом удельное электросопротивление обработанного материала снижается с уровня 10000 до 1000 мкОм·м [4]. Это позволяет использовать на финишной стадии тепловой обработки высокотемпературный резистивный электронагрев в слое. В настоящее время известны два основных тепло-технологических процесса высокотемпературной обработки углеродного материала: при нагреве в плотном и кипящем слое.

Процесс нагрева в плотном слое реализуется в электрокальцинаторах шахтного типа (рис. 1), где предварительный разогрев сырого материала до 900 °С и последующий резистивный нагрев до температур 2000 °С осуществляется в одном агрегате путем пропускания тока между верхним и нижним электродами непосредственно через плотный слой угля с размерами частиц 6–25 мм. Именно такой вариант технологии используется на ведущем в Украине предприятии производителе электродов ПАО «Укрграфит».

В электрокальцинаторе шахтного типа реализуется непрерывный технологический процесс при последовательном движении слоя материала через зоны нагрева, прокалики и охлаждения. Процесс высокотемпературного резистивного нагрева определяется мощностью и распределением источников теплоты, то есть распределением силы тока по радиусу и высоте слоя материала, находящегося между электродами. Исследования, проведенные в промышленных условиях, показали, что в процессе электронагрева наблюдается неравномерное распределение источников теплоты в объеме электрокальцинатора [5]. Это

вызывает перегрев центральной части антрацита, находящегося у электродов, что в свою очередь приводит к увеличению неравномерности распределения силы тока по радиусу, так как с увеличением температуры удельное электросопротивление слоя антрацита снижается [4]. В результате качество готовой продукции (термоантрацита), двигающегося на периферии у футеровки электрокальцинатора, не удовлетворяет поставленным требованиям в связи с заниженной температурой обработки. Это приводит к необходимости использовать повторную обработку материала в кальцинаторе (двухстадийный режим), что значительно увеличивает энергозатраты до уровня 1360-1380 кВт·ч/т готового продукта. Решение проблемы возможно двумя путями: рациональным расположением электродов [3] и изменением профиля рабочего пространства [4]. Так уменьшение расстояния между электродами до 1500 мм обеспечивает возможность проведения одностадийного процесса прокалики с удельным расходом энергии 1300-1330 кВт·ч/т [3]. Изменение профиля рабочего пространства с установкой пережима (дресселя) в зоне прокалики обеспечивает «перемешивание» угля при его вертикальном движении и обеспечивает равномерное распределение силы тока в суженном сечении шахты электрокальцинатора. Все это позволило повысить качество нагрева, перейти на одностадийный режим прокалики и снизить затраты электроэнергии до 500-600 кВт·ч/т готовой продукции. Аналогичный результат получен на оборудовании фирмы ELKEM [4] при переходе на овальное сечение шахты кальцинатора и горизонтальное расположение электродов. При этом удельный расход электроэнергии не превышал 500 кВт·ч/т.

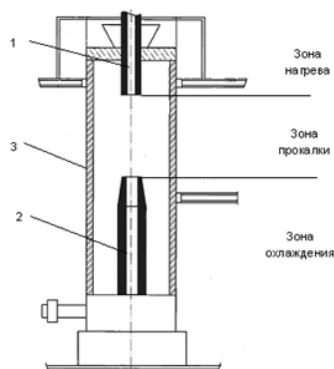


Рис. 1. Схема электрокальцинатора [4]:
1 – верхний электрод;
2 – нижний электрод; 3 – футеровка

В электрокальцинаторе шахтного типа реализуется непрерывный технологический процесс при последовательном движении слоя материала через зоны нагрева, прокалики и охлаждения. Процесс высокотемпературного резистивного нагрева определяется мощностью и распределением источников теплоты, то есть распределением силы тока по радиусу и высоте слоя материала, находящегося между электродами. Исследования, проведенные в промышленных условиях, показали, что в процессе электронагрева наблюдается неравномерное распределение источников теплоты в объеме электрокальцинатора [5]. Это вызывает перегрев центральной части антрацита, находящегося у электродов, что в свою очередь

приводит к увеличению неравномерности распределения силы тока по радиусу, так как с увеличением температуры удельное электросопротивление слоя антрацита снижается [4]. В результате качество готовой продукции (термоантрацита), двигающегося на периферии у футеровки электрокальцинатора, не удовлетворяет поставленным требованиям в связи с заниженной температурой обработки. Это приводит к необходимости использовать повторную обработку материала в кальцинаторе (двухстадийный режим), что значительно увеличивает энергозатраты до уровня 1360-1380 кВт·ч/т готового продукта. Решение проблемы возможно двумя путями: рациональным расположением электродов [3] и изменением профиля рабочего пространства [4]. Так уменьшение расстояния между электродами до 1500 мм обеспечивает возможность проведения одностадийного процесса прокалики с удельным расходом энергии 1300-1330 кВт·ч/т [3]. Изменение профиля рабочего пространства с установкой пережима (дресселя) в зоне прокалики обеспечивает «перемешивание» угля при его вертикальном движении и обеспечивает равномерное распределение силы тока в суженном сечении шахты электрокальцинатора. Все это позволило повысить качество нагрева, перейти на одностадийный режим прокалики и снизить затраты электроэнергии до 500-600 кВт·ч/т готовой продукции. Аналогичный результат получен на оборудовании фирмы ELKEM [4] при переходе на овальное сечение шахты кальцинатора и горизонтальное расположение электродов. При этом удельный расход электроэнергии не превышал 500 кВт·ч/т.

Таким образом, использование шахтных электрокальцинаторов обеспечивает получение термоантрацита заданного электросопротивления при удельных затратах электроэнергии 1380-500 кВт·ч/т. При этом для энергетического обеспечения процесса используется частичное сжигание исходного сырья за счет подсосов воздуха в рабочее пространство печи [4]. Следует отметить, что очистка углеродных материалов при нагреве до температур 1250-1400 °С не всегда приемлема. При производстве металлов так называемого нового поколения повышаются требования к чистоте углеродного карбюризатора. Так, температура обработки углеродного сырья, указываемая ведущими мировыми производителями, достигает уровня 2000 °С и выше. Увеличение температуры обработки на кальцинаторах шахтного типа требует их коренной реконструкции. Как минимум, материалы, используемые для их футеровки, состоящие из муллитокорундовых огнеупоров с температурой размягчения 1580-1600 °С требуют замены.

Альтернативой процессу высокотемпературной обработки в плотном слое является использование печей с электротермическим кипящим слоем [5-7]. Для реализации данного процесса высокотемпературного нагрева (2500-2700 °С) углеродного материала необходимо использование нейтральной газовой атмосферы, исключаяющей интенсивное химическое взаимодействие газов с футеровкой печи

из графитовых блоков. Учитывая это, промышленная компания American Energy Technologies Co. (АЕТС) предложила двухстадийную технологию прокалики углеграфитового прекурсора, включающую первую стадию - нагрев исходного сырья до температуры 900-1200 °С с целью удаления основной части летучих примесей, и вторую стадию - высокотемпературную обработку частично-очищенного сырья в печах с электротермическим кипящим слоем при температуре до 2800 °С.

Первая стадия обработки может осуществляться в печах с газовым нагревом (вращающиеся, циклонные) или в печах косвенного электронагрева (вращающиеся муфельные, печи с пульсирующим или тарельчатым подом), а также в печи резистивного нагрева с системой утилизации теплоты готового

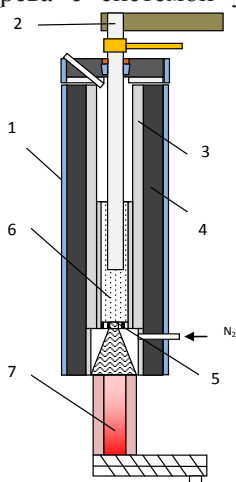


Рис. 2. Схема печи с электротермическим кипящим слоем: 1 – водоохлаждаемый корпус печи; 2 – центральный электрод; 3 – графитовая футеровка печи (периферийный электрод); 4 – тепловая изоляция; 5 – газораспределительная решетка; 6 – кипящий слой материала; 7 – холодильник

продукта [4]. Сравнение удельных затрат энергии для первой стадии обработки углеродного сырья представлены в табл. 1.

Увеличение энергозатрат на печах с газовым отоплением связано, в первую очередь, с дополнительными потерями энергии за счет теплоты, уносимой продуктами сгорания, уходящими из рабочего пространства печи.

Таблица 1. Удельные энергозатраты при кальцикации нефтяного кокса

Тип печи	Печи с газовым отоплением (вращающиеся, циклонные)	Печи с косвенным электронагревом (вращающиеся муфельные, с пульсирующим или тарельчатым подом)	Печь с резистивным нагревом
Удельный расход энергии, кВт·ч/т	925 -850	890-400	200-100

Для реализации второй стадии нагрева используют печь, принципиальная схема, которой приведена на рис. 2. Печь работает непрерывно, материал поступает в кипящий слой из углеродного материала 6 с размерами частиц 0,2-2 мм. Слой нагревается за счет прохождения тока от центрального электрода 2 к периферийному электроду 3. Нагретый материал через центральное отверстие газораспределительной решетки 5 поступает в водоохлаждаемый холодильник 7 и выгружается с температурой не выше 300 °С.

Наличие кипящего слоя решает несколько технологических и технических задач одновременно: позволяет повысить электрическое сопротивление слоя по сравнению с электросопротивлением плотного слоя частиц углеродного материала; обеспечивает вынос летучих компонентов и возгонов при высокотемпературном нагреве из рабочей камеры печи; создает условия для равномерной обработки материала за счет его интенсивного перемешивания. Анализ данных о величине удельного электрического сопротивления кипящего слоя [5, 6] показал, что при переходе от плотного слоя к кипящему величина электросопротивления возрастает в 4-7 раз и в дальнейшем возрастает при увеличении порозности слоя. С повышением температуры и силы тока электросопротивление снижается. Эти данные могут быть объяснены исходя из механизма проводимости в кипящем слое [5]. Этот механизм связан с образованием контактных цепочек между частицами, их разрушением и повторным образованием, что приводит к значительному тепловыделению в местах контакта частиц. Очевидно, что при увеличении скорости газа, поступающего в

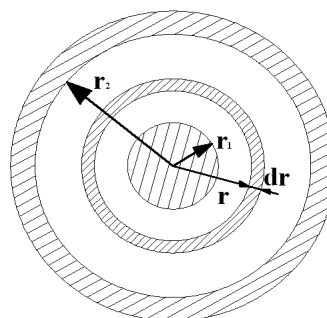


Рис. 3. Схема расположения электродов в печи

слой, и увеличению объема слоя концентрация частиц падает. Соответственно количество контактных цепочек сокращается, и сопротивление слоя растет. В тоже время, при увеличении температуры до уровня 2000 °С и более возможна ионизация газа и повышение электропроводности слоя за счет увеличения проводимости газовых зазоров между частицами.

Особенность нагрева углеродного материала в печи рассмотренной конструкции (рис. 3) связана с изменением площади сечения проводящего слоя при изменении радиуса. Минимальная площадь соответствует радиусу центрального электрода r_1 . Максимальная - внутреннему радиусу периферийного электрода r_2 . Увеличение площади приводит к изменению электрического сопротивления, величина которого для элементарного слоя dr имеет вид

$$dR = \rho \frac{dr}{S}$$

где R – электросопротивление, Ом;

ρ - удельное электрическое сопротивление кипящего слоя материала, Ом·м; $S = 2\pi r h$ – площадь слоя, перпендикулярного направлению движения тока, м²; h – высота рабочей зоны печи, м.

Учитывая, что суммарное значение силы тока I в любом сечении слоя остается неизменным, распределение мощности источников теплоты при резистивном нагреве имеет вид

$$dN = I^2 \frac{\rho}{2\pi h} \frac{dr}{r}$$

Моделирование процесса нагрева кипящего слоя, основанное на решении одномерной задачи теплопроводности для полого цилиндра с внутренними источниками теплоты при адиабатных граничных условиях на его поверхностях, позволило оценить величину перепада температур по радиусу нагреваемого слоя и распределение температуры при установившемся режиме работы печи. В расчетах использован метод элементарных тепловых балансов и метод итераций. Изменение величины удельного электросопротивления от температуры на первом этапе не учитывалось и принималось постоянным по сечению и равным $\rho = 0,048 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Для учета теплопереноса в псевдоожиженном слое использована величина эффективной теплопроводности слоя, определяемая исходя из равенства коэффициента диффузии и коэффициента температуропроводности кипящего слоя [7]. Значение варьировалось в расчетах от 0,3 до 700 Вт/(м·К). Верхнее значение соответствовало оценкам этой величины, приведенным в [7]. Значительная величина коэффициента эффективной теплопроводности псевдоожиженного слоя предопределяется интенсивной циркуляцией материала в виде пакетов частиц, характерных для развитых режимов псевдоожижения с порозностью слоя равной 0,5-0,6. Минимальное значение исследованного диапазона коэффициента эффективной теплопроводности характерно для плотного слоя зернистого материала, которая определяется величиной теплопроводности газонаполненных зазоров между частицами.

Результаты расчетов (рис. 4) показали, что перепад температур по сечению слоя определяется вели-

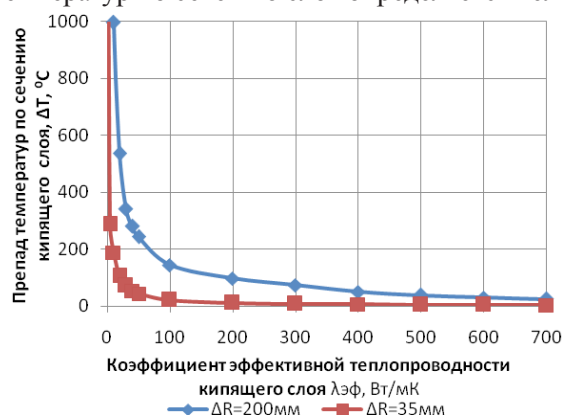


Рис. 4. Зависимость перепада температур по сечению кипящего слоя от величины

чины эффективной теплопроводности и геометрическими размерами псевдоожиженного слоя (расстоянием между электродами). Так, при отсутствии циркуляции в слое (режим потери устойчивости плотного слоя) перепад температур достигал 2000-3000 °С, что исключает стабилизацию процесса термической обработки. При увеличении коэффициента эффективной теплопроводности до 50-100 Вт/мК величина перепада температур снижалась до $\Delta T = 50-200 \text{ }^\circ\text{C}$ при расстоянии между электродами $\Delta R = 35-200 \text{ мм}$, соответственно. Дальнейшее увеличение теплопроводности слоя приводит к плавному снижению перепада

температур до 4-25 °С.

Таким образом, реализация процесса высокотемпературной обработки углеродных материалов в электротермическом кипящем слое в условиях радиального направления тока возможна при условии развитого режима псевдоожижения. Именно процесс перемешивания материала определяет выбор параметров подачи оживающего газа.

Таблица 2. Тепловой баланс печи с электротермическим кипящим слоем производительностью 1 т/ч

Приходные статьи			Расходные статьи		
Название	кВт	%	Название	кВт	%
Теплота сырья	12	0,7	Теплота готового продукта	1563	91
Теплота азота	0	0,0	Теплота отходящих газов	3	0,1
Электроэнергия	1706	99,3	Теплота уноса	78	4,6
			Водяное охлаждение	74	4,3
Итого	1718	100		1718	100

Расчеты материального и теплового баланса печей с электротермическим кипящим слоем (табл. 2) показали, что удельные затраты электроэнергии высокотемпературной обработки углеродного материала в печи производительностью 1 т/ч составляют 1500-1700 кВт; ч/т готовой продукции. При этом затраты электроэнергии определяются потерями с теплотой готового продукта, удаляемого из печи (более 90 % потребленной энергии). То есть, утилизация теплоты готового продукта является основным направлением совершенствования тепловой работы печей с электротермическим кипящим слоем.

Выводы

Основными направлениями совершенствования эффективности работы печей высокотемпературной обработки углеродных материалов для нужд металлургии является повышение температуры обработки до 2500-2700 °С и снижение энергозатрат.

Существующие печи с т.н. плотным слоем обеспечивают обработку сырья до температуры 2000 °С с удельными энергозатратами 1380-500 кВт; ч/т.

Повышение температуры обработки может быть реализовано по двухстадийной технологии, предложенной АЕТС: первая стадия—обработка исходного сырья при температуре 900-1200 °С; вторая стадия—высокотемпературная обработка (2500-2700°С) в печи с электротермическим кипящим слоем. Удельные затраты электроэнергии на каждой стадии составляют, соответственно, 200-900 и 1500-1700 кВт;ч/т.

Перспективным направлением совершенствования конструкции печей двухстадийной технологии АЕТС является использование теплоты отходящего готового продукта для предварительного нагрева сырья. Реализация этого направления на первой ста-

дии обработки позволила снизить энергозатраты до 200 кВт. ч/т.

Выбор режимов работы печей с электротермическим кипящим слоем и коаксиальным расположением электродов определяется характеристиками исходного и термически обработанного материала, гидродинамическим режимом кипящего слоя в рабочем пространстве печи, которые влияют на выбор основных геометрических и технологических параметров печи: расход оживающего газа, силу тока и напряжение на электродах.

Библиографический список

1. Нефтяной кокс для алюминиевой промышленности. Технология и свойства / В.П. Твердохлебов, С.А. Храменко, Ф.А. Бурюкин и др. // Журнал Сибирского федерального университета. С. Химия. - 2010. - № 4. - С. 369-386.
2. Гасик М.М., Гасик М.И. и др. Комплексная модель прокаливания антрацита в электрокальцинаторе // Электрометаллургия. - 2007. - № 2. - С. 30-36.
3. Исследование влияния межэлектродного расстояния на распределение мощности в антрацитовой загрузке электрокальцинатора и качество термоантрацита / С.В. Кутузов, О.Ю. Уразлина, В.В. Деркач и др. // Metallurg. и горноруд. пром-сть. - 2006. - № 5. - С. 25-29.

4. Петров Б.Ф. Энергосбережение при производстве электродного термоантрацита. - К.: ЭкоТехнология, 2006. - 144 с.

5. Бородуля В.А. Высокотемпературные процессы в электротермическом кипящем слое. - Минск: Наука и техника, 1973. - 173 с.

6. Забродский С.С. Высокотемпературные установки с псевдоожиженным слоем. - М.: Энергия, 1971. - 328 с.

7. Тодес О.М., Цитович О.Б. Аппараты с кипящим зернистым слоем. - Л.: Химия, 1981. - 296 с.

Авторы выражают благодарность за поддержку в рамках программы *GIPP (Global Initiatives for Proliferation Prevention)* Министерства Энергетики США (контракт BNL-T2-0372-UA) и сотрудникам Украинского научно-технологического центра Дудко Н.Н. и Четвертак Ю.Б. за помощь в реализации партнерского проекта P482. Выражаем также свою благодарность коллегам из Конструкторского бюро «Южное» Луценко В.И., Тырыгину Я.А., Никитенко К.А. и Писаренко В.Ю., принимающих участие в выполнении проекта.

Поступила 06.02.2013

Требования к статьям, направляемым в редакцию

Уважаемые авторы! Для ускорения подготовки очередных номеров журнала редакция обращается с просьбой ко всем авторам передавать статьи в электронном виде на носителях в виде CD-R или CD-RW матриц, либо на флешке. Возможна также передача материалов в редакцию по электронной почте. Отправка в редакцию статей в электронном виде не исключает необходимости предоставления сопроводительного письма от организации и подписанного авторами одного экземпляра статьи.

В редакцию следует предоставлять статью, отпечатанную четкими черными буквами на **белой бумаге** формата А4 (210x297 мм) в двух экземплярах, объемом не более 6-8 стр. При компьютерном наборе статей желательна распечатка на лазерном или струйном принтере в нормальном (не экономичном) режиме (для первого экземпляра). Количество иллюстраций (рисунков) должно быть не более 4-х (как исключение - до 6). Статья должна начинаться с указания *индекса УДК*. К статье необходимо приложить **аннотацию, рефераты на русском и английском языках** объемом до 0,5 страницы, **перечень ключевых слов, сопроводительное письмо от организации, сведения об авторах** (указать фамилию, имя и отчество, ученое звание, степень, занимаемая должность, место работы, номер служебного телефона и адрес электронной почты каждого автора (при наличии) и указать, кому из авторов поручено вести переписку). Перед отправкой в редакцию статья должна быть **тщательно вычитана и подписана всеми авторами**. Статьи в рукописном виде, а также содержащие **многочисленные исправления в тексте, не принимаются.**

• **Компьютерный набор** статей следует осуществлять в текстовом редакторе **MS Word (формат файлов *.doc или *.rtf)**, без переносов, шрифтом Times New Roman. Размер символов - 14 пт. Допускается включение в текст статьи рисунков, выполненных средствами **MS Office**, при этом элементы одного рисунка следует группировать. **Вставка в текст сканированных и других изображений (например, с цифровой фотокамеры) не рекомендуется.** Такие изображения желательно предоставлять в виде отдельных файлов (предпочтительны форматы *.tif или *.jpg с разрешением 300 dpi, ч/б фото).

• **Формулы из MathCad и т.п. программ в тексте не допускаются.** *Убедительная просьба к авторам не разбивать текст статьи на колонки, как это сделано в журнале, т.к. это только усложняет их обработку!*

• **Таблицы** следует пронумеровать и дать им заголовки. Единицы физических величин должны быть указаны в соответствии с Международной системой единиц (СИ). При компьютерном наборе рекомендуемый размер символов в таблицах 8...9 пт (для очень емких таблиц - до 6 пт). Наличие в тексте таблиц, границы которых выходят за поля страницы нежелательно.

• **В библиографическом списке** необходимо привести фамилии и инициалы авторов, точное название книги и сборника, сведения о повторности издания, место издания, издательство (или издающую организацию), год издания и общее число страниц. В тексте статьи при ссылке на книгу желательно указать конкретную страницу, материал которой был использован. Для статей из журналов и сборников следует указать фамилии и инициалы первых трех авторов, название статьи, название издания (чи труды, если это сборник), год выхода, номер и страницы, на которых напечатана статья. Иностранные источники описываются на языке оригинала.

Редакция оставляет за собой право отправлять статьи авторам на доработку в следующих случаях:

- статья небрежно оформлена и не соответствует требованиям редакции без подписей авторов (см. выше);
- статья требует доработки в соответствии с замечаниями редактора раздела;
- к статье не прилагается разрешение на публикацию от организации, в которой работают авторы.

Требования и пожелания к рекламным и т.п. материалам, публикация которых оплачивается, а также «экстренные» публикации согласовываются непосредственно в редакции с ответственным секретарем журнала

Редакция журнала «Металлургическая и горнорудная промышленность»
Тел. (0562) 46-12-95, отв. секретарь (056) 744-81-66. E-mail: metinfo@metinform.dp.ua; mgp@metalfjournal.com.ua