

## Выбор схемы обогащения красных шламов<sup>1</sup>

УДК 669.711:662.818.3

Г. И. Газалеева, А. А. Мушкетов (ст.), Н. А. Сопина, И. А. Власов, С. А. Упоров\*

Приведены результаты исследования свойств мономинеральных фракций, выделенных из красного шлама. Основными фракциями красного шлама являются гематит, шамозит и кальцит. Данные фракции были получены методами обогащения. У мономинеральных фракций были определены вещественный состав и физические свойства (признаки), такие как удельная магнитная восприимчивость и истинная плотность, а также рассчитан коэффициент контрастности между отдельными фракциями по каждому из физических признаков. Максимальные значения коэффициентов контрастности 3,75 и 2,3 по удельной магнитной восприимчивости соответственно были получены между гематитом и кальцитом и гематитом и шамозитом. Это позволило спрогнозировать в качестве первых операций технологической схемы обогащения основную и перечистную высокоградиентную магнитную сепарацию с индукцией магнитного поля 1,4–1,5 Тл, значения которой были получены при изучении зависимости удельного магнитного момента мономинеральных фракций от заданной индукции поля. Дальнейшие операции схемы (гравитационные) были спрогнозированы на основании анализа коэффициентов контрастности фракций и проверены с использованием концентрационного стола и сепаратора Knelson. По результатам исследований выдана оптимальная технологическая схема обогащения красного шлама с получением железного концентрата с содержанием железа общего 50 %.

**Ключевые слова:** красный шлам, мономинеральные фракции, коэффициент контрастности, индукция магнитного поля, сепаратор, концентрационный стол, технологическая схема обогащения, красный шлам.

Целью настоящей работы являлось прогнозирование технологических операций схемы обогащения красных шламов до получения железного концентрата по результатам исследования свойств основных мономинеральных фракций исходного сырья.

Переработка боксита с получением глинозема приводит к образованию значительного объема отходов — красных шламов — более 1 млн т/год на каждом алюминиевом заводе России. В промышленных условиях переработка красных шламов не осуществляется. Предлагались пиро- и гидрометаллургические методы переработки красных шламов, но они нерентабельны [1].

Основными минералами красного шлама являются гематит, шамозит, кальцит и алюмосиликаты (последние не были наработаны). Шамозит имеет химическую формулу  $\text{Fe}_4\text{Al}[\text{AlSi}_2\text{O}_{10}(\text{OH})_6]$  [2]. Он переходит в красные шламы из бокситов, в частности Тиманского месторождения [3–5]. Для полу-

чения мономинеральных фракций из красных шламов использовали магнитные и гравитационные методы обогащения.

Химический состав исходных красных шламов, %: 41,8  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ; 13,5  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; 9,79  $\text{SiO}_2$ ; 4,78  $\text{TiO}_2$ ; 8,77  $\text{CaO}$ ; 0,85  $\text{S}_{\text{общ}}$ ; 0,96  $\text{MgO}$ ; 33,3  $\text{Fe}_{\text{общ}}$ ; 5,25  $\text{FeO}$ ; 0,21  $\text{K}_2\text{O}$ ; 4,08  $\text{Na}_2\text{O}$ ; 5,78 ППП.

Содержание железа общего в исходных красных шламах составило 33,3 %.

В результате наработки были получены мономинеральные фракции, содержание железа общего в которых составило:

- 55,7 % для мономинеральной фракции гематита;
- 34,7 % для мономинеральной фракции шамозита;
- 85 % для мономинеральной фракции кальцита, содержащей  $\text{CaO}$ .

Вид полученных мономинеральных фракций под микроскопом приведен на рис. 1.

По результатам минералогических исследований основная масса частиц пробы мономинеральной фракции гематита состоит из агрегатов гематит-гетитового состава с включениями алюмосиликатов, в том числе шамозита [6]. При этом различаются два вида агрегатов: слабо- и сильнопористые полифазные агрегаты. Проба мономинеральной фракции шамозита существенно «загрязнена» гематитом. При изучении фазового состава

<sup>1</sup> Работа выполнена при участии О. Ю. Шешукова.

\* Г. И. Газалеева, зам. ген. директора по науке, e-mail: gazaleeva\_gi@umbg.ru; А. А. Мушкетов, ст. науч. сотр. отдела обогащения; Н. А. Сопина, гл. обогатитель отдела обогащения; И. А. Власов, науч. сотр. химико-аналитической лаборатории, ООО «Уралмеханобр», г. Екатеринбург; С. А. Упоров, вед. инженер, лаб. статистики и кинетики металлургических процессов, Институт металлургии УрО РАН, г. Екатеринбург.

Таблица 1  
Физические свойства чистых минералов и мономинеральных фракций

Минерал	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Магнитная восприимчивость $\chi \cdot 10^{-6}$ , см <sup>3</sup> /г	Содержание элементов, %
Гематит	5,3/4,35	14–143/1–3	69,9/55,7 Fe <sub>общ</sub>
Шамозит	3,11/3,45	7–72/0,3–1,3	26,8–37,1/34,7 Fe <sub>общ</sub>
Кальцит	2,75/2,63	–0,38–21,8/0,2–0,8	56,0/45,2CaO

Примечание. В числителе указаны справочные значения, в знаменателе — полученные экспериментально.

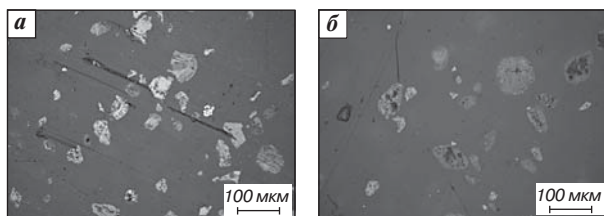


Рис. 1. Мономинеральная фракция гематита (а) и шамозита (б). Полированный шлиф, отраженный свет, без анализатора (×200)

наблюдается асимметрия, что указывает на напряженность и неоднородность кристаллической решетки шамозита.

У всех полученных мономинеральных фракций были определены такие физические признаки, как удельная магнитная восприимчивость, намагниченность (магнитный момент), истинная плотность (табл. 1).

На рис. 2 приведены дифференциальные кривые удельной магнитной восприимчивости мономинеральных фракций гематита и шамозита [7–9].

В табл. 2 представлены результаты определения истинной плотности мономинеральных фракций и рассчитанный коэффициент контрастности ( $K_{\text{кон}}$ ) фракций по данному физическому признаку.

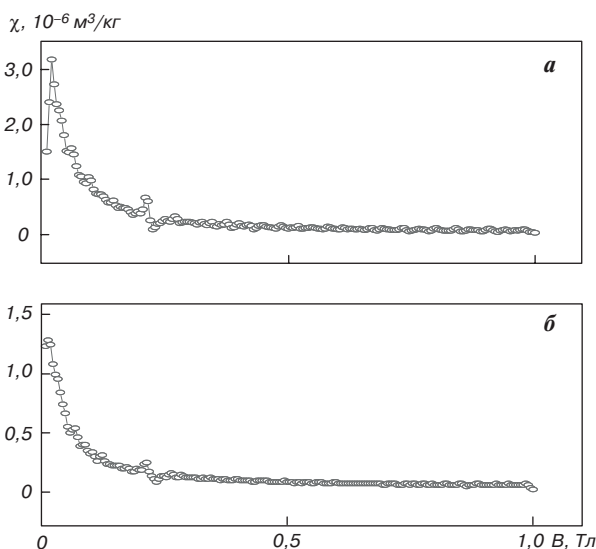


Рис. 2. Кривые дифференциальной магнитной восприимчивости мономинеральных фракций гематита (а) и шамозита (б)

Таблица 2  
Плотность мономинеральных фракций

Минерал	Плотность, т/м <sup>3</sup>	$K_{\text{кон}}$
Гематит	4,35	$K_{\text{CaO}} = 1,65; K_{\text{шам}} = 1,26$
Шамозит	3,45	$K_{\text{CaO}} = 1,31; K_{\text{Fe}_2\text{O}_3} = 1,26$
Кальцит	2,63	$K_{\text{Fe}_2\text{O}_3} = 1,65; K_{\text{шам}} = 1,31$

Технологические операции обогащения красных шламов выбирали, исходя из сравнения коэффициентов контрастности мономинеральных фракций гематита, шамозита и кальцита по отношению друг к другу по физическим признакам — удельной магнитной восприимчивости ( $\chi$ ) и плотности ( $\rho$ ). На рис. 3 изображена диаграмма изменения  $K_{\text{кон}}$  мономинеральных фракций сначала по  $\chi$ , затем по  $\rho$ .

Максимальный коэффициент контрастности 3,75 по физическому признаку удельной магнитной восприимчивости соответствует разнице между мономинеральными фракциями гематита и кальцита. Следующий по значимости — коэффициент контрастности гематита и шамозита (2,3) — также по физическому признаку удельной магнитной восприимчивости.

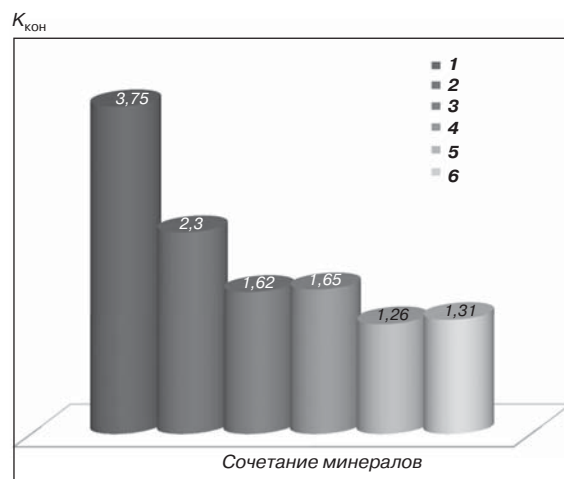


Рис. 3. Сравнение взаимной контрастности мономинеральных фракций:  
по  $\chi$ : 1 — гематит — кальцит; 2 — гематит — шамозит; 3 — шамозит — кальцит;  
по  $\rho$ : 4 — гематит — кальцит; 5 — гематит — шамозит; 6 — шамозит — кальцит

Исходя из этого, в «голове» технологической схемы обогащения красных шламов предполагается проводить основную и перечистную операции мокрой магнитной сепарации. Для того, чтобы определить индукцию (напряженность) магнитного поля, требуемую для данных операций разделения, были построены зависимости удельного магнитного момента мономинеральных фракций от магнитной индукции поля. Индукция при этом изменялась от 0 до 2 Тл (рис. 4). Исходя из полученных данных, оптимальная магнитная индукция поля аппарата разделения исследуемых мономинеральных фракций составляет 2 Тл, однако с учетом обеспечения максимального выхода магнитного продукта в схеме предлагается использовать высокоградиентные мокрые магнитные сепараторы (ВГММС) с индукцией 1,4–1,5 Тл. Третий по значимости коэффициент,

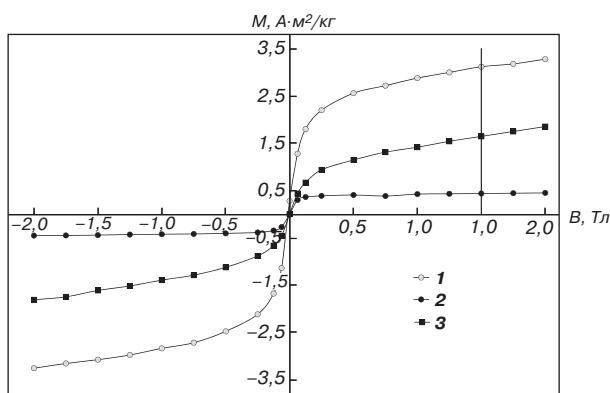


Рис. 4. Зависимость удельного магнитного момента мономинеральных фракций под действием магнитного поля с изменением индукции магнитного поля от 0 до 2 Тл: 1 — гематит; 2 — кальцит; 3 — шамозит

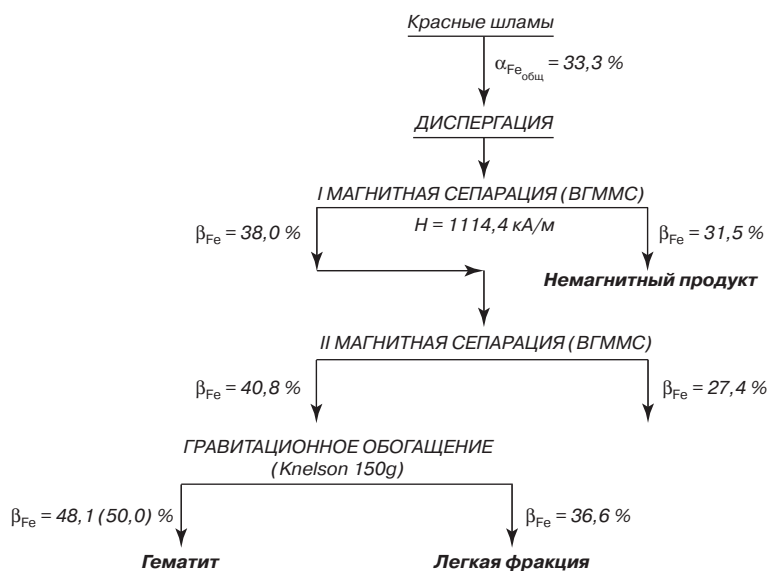


Рис. 5. Предварительная схема обогащения красных шламов с использованием концентратора Knelson

Продукты обогащения	Выход, %	Содержание железа, %	Извлечение железа, %
Концентрат	15,0	50,0	49,67
Хвосты	22,0	34,54	50,33
Исходный продукт	37,0	40,8	100,0

равный 1,65, — по физическому признаку истинной плотности соответствует разнице между мономинеральными фракциями гематита и кальцита. Выбор аппаратов гравитационного обогащения [10] проводили по результатам испытаний на гравитационном концентраторе Knelson и концентрационном столе.

На основании ранжирования коэффициентов контрастности мономинеральных фракций составлена и опробована в лабораторных условиях предварительная технологическая схема обогащения красных шламов с получением железного концентрата (рис. 5). На представленной схеме приведены результаты опробования с применением в последней операции сепаратора Knelson. Гравитационное обогащение также было проведено на концентрационном столе Holman.

Параметры работы стола были следующими:

Производительность стола, т/ч	0,4–0,6
Число качаний деки стола, мин <sup>-1</sup>	280
Продольный угол наклона стола, град.	3–0,5
Поперечный угол наклона стола, град.	0–2
Расход смывной воды, м <sup>3</sup> /т	1–2

Показатели обогащения, полученные при оптимальном режиме работы стола, представлены в табл. 3.

Оптимальной является схема с применением концентрационного стола Holman. Она позволяет получать 15 % Fe концентрата с содержанием железа общего 50 %.

### Выводы

1. Изучение таких физических свойств наработанных мономинеральных фракций, как удельная магнитная восприимчивость и истинная плотность, позволило определить коэффициенты контрастности между фракциями.

2. Ранжирование коэффициентов контрастности позволило выбрать приоритетный метод обогащения красных шламов — высокоградиентную магнитную сепарацию.

3. При изучении зависимости удельного магнитного момента мономинеральных фракций от индукции магнитного поля определена оптимальная индукция магнитного поля, составившая 1,4–1,5 Тл.

4. По результатам изучения мономинеральных фракций предложена технологическая схема обогащения красных шламов. Оптимальный вариант с использованием концентрационного стола позволя-

ет получать железный концентрат с содержанием железа общего 50 % и выходом 15 %.

Работа выполнена в рамках Государственного контракта ГК № 14.515.11.0036 «Разработка научно-технических основ утилизации и переработки отходов металлургического производства для применения их при получении железорудного сырья для доменного производства чугуна».

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Смирнов Д. И., Молчанова Т. В., Водолазов Л. И., Пеганов В. И. Методы переработки красных шламов // Цветные металлы. 2002. № 8. С. 64–69.
2. Сабирзянов Н. А., Яценко С. П. Гидрохимические способы комплексной переработки боксита. — Екатеринбург : УрО РАН, 2006. — 386 с.
3. Яценко С. П., Пягай И. Н., Пасечник Л. А., Суриков В. Т., Анашкин В. С., Климентенко Г. Н. Комплексная переработка и обезвреживание отхода глиноземного производства — красных шламов // Третий международный конгресс «Цветные металлы — 2011», г. Красноярск. 2011. С. 123–126.
4. Брагин Ю. Н., Добровольская Т. И., Борисов В. В., Дягтяренко А. В. Новая технология получения товарных продуктов из красных шламов // Состояние проблемы и направления использования в народном хозяйстве красного шлама // Сборник научных докладов, г. Николаев. 1998. С. 23–30.
5. Котова О. Б. Адсорбционные методы обогащения тонкодисперсного минерального сырья. — СПб. : Наука, 2000. — 80 с.
6. Козин В. З. Безотходные технологии горного производства // Горный журнал. 2001. № 4/5. С. 167–190.
7. Газалева Г. И., Орлов С. Л., Савин А. Г., Закиричный В. Н. Перспективные направления обогащения техногенных отходов // Экология и промышленность России. 2013. № 1. С. 13–16.
8. Газалева Г. И., Орлов С. Л., Сопина Н. А., Мушкетов А. А., Анашкин В. С., Вишняков С. Е., Климентенко Г. Н., Петров С. И., Котова О. Б. Влияние вещественного состава красных шламов на технологические показатели их обогащения // Четвертый международный конгресс «Цветные металлы — 2012», г. Красноярск. 2012. С. 128–130.
9. Газалева Г. И., Орлов С. Л., Мушкетов А. А. (ст.), Сопина Н. А., Братыгин Е. В., Дмитриева Е. Г., Анашкин В. С., Климентенко Г. Н. Разработка технологии обогащения красных шламов Уральского алюминиевого завода // Труды Междунар. конф. «Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья», г. Екатеринбург. 2012. С. 25–27.
10. Газалева Г. И., Щербакова З. Х., Червяков С. А., Иванова С. П. Современные методы сверхтонкого измельчения и селективного воздействия на частицы руд и техногенных материалов // Междунар. конф. «Плаксинские чтения 2012», г. Петрозаводск. 2012. С. 158–159. LIM

## CHOICE OF THE CONCENTRATION SCHEME OF RED MUDS, ACCORDING TO THE RESEARCH RESULTS OF MONOMINERAL FRACTIONS

### Information about authors

G. I. Gazaleeva<sup>1</sup>, Deputy Chief Executive Officer on Science  
A. A. Mushketov<sup>1</sup>, Senior Researcher of Concentration Department  
N. A. Sopina<sup>1</sup>, Chief Dresser of Concentration Department  
I. A. Vlasov<sup>1</sup>, Researcher of Chemical and Analytical Laboratory, e-mail: www//umbr@umbr.ru  
S. A. Uporov<sup>2</sup>, Leading Engineer of Laboratory of Statics and Kinetics of Metallurgical Processes

<sup>1</sup> “Uralmekhanobr” JSC, Ekaterinburg, Russia.

<sup>2</sup> Institute of Metallurgy of Ural Department of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia.

### Abstract

The present work represents research results of properties of monomineral fractions, extracted from red muds. Main fractions of a red mud are hematite, chamosite and calcite. These fractions were obtained by methods of beneficiation. Material composition and physical properties (signs) of monomineral fractions were defined such as specific magnetic susceptibility and a true density and also the contrast coefficient between separate fractions on each of physical signs was calculated. Maximum values of contrast coefficients 3.75 and 2.3 on a specific magnetic susceptibility respectively were received between hematite, calcite and chamosite. As first steps within a process flow sheet it enabled to

predict a main and a cleaning high-gradient magnetic separation with the induction of the magnetic field 1.4–1.5 T, the values of which were obtained by studying dependence of a specific magnetic moment of monomineral fractions of a given field induction. Further steps of the flow sheet (gravity) were predicted on basis of a following analysis of contrast coefficients of fractions and were checked with an use of a concentrating table and a Knelson separator. By results of research there was issued an optimum process flow sheet of the red mud with a receipt of iron concentrate with Fe content — 50%.

**Key words:** red mud, monomineral fractions, contrast coefficient, an induction of the magnetic field of a separator, concentrating table, process flow sheet of a red mud.

### References

1. Smirnov D. I., Molchanova T. V., Vodolazov L. I., Peganov V. I. *Tsvetnye Metally — Non-ferrous metals*. 2002. No. 8. pp. 64–69.
2. Sabirzyanov N. A., Yatsenko S. P. *Gidrokhimicheskie sposoby kompleksnoy pererabotki boksita* (Hydrochemical methods of complex processing of bauxite). Ekaterinburg : Ural Department of Russian Academy of Sciences, 2006. 386 p.
3. Yatsenko S. P., Pyagay I. N., Pasechnik L. A., Surikov V. T., Anashkin V. S., Klimentenok G. N. *Kompleksnaya pererabotka i obvezvrezhivanie otkhoda gliozemnogo proizvodstva — krasnykh shlamov* (Complex processing and neutralization of wastes of aluminous production — red muds). *Tretiy mezhdunarodnyy kongress “Tsvetnye metally — 2011”, Krasnoyarsk* (Third International congress “Non-ferrous metals — 2011”, Krasnoyarsk). 2011. pp. 123–126.

4. Bragin Yu. N., Dobrovolskaya T. I., Borisov V. V., Dyagtyarenko A. V. Novaya tekhnologiya polucheniya tovarnykh produktov iz krasnykh shlamov (New technology for obtaining of marketable products from red muds). Sostoyanie problemy i napravleniya ispolzovaniya v narodnom khozyaystve krasnogo shlama (Status of problem and direction of usage of red mud in national economy). *Sbornik nauchnykh dokladov, Nikolaev* (Collection of scientific papers, Nikolaev). 1998. pp. 23–30.
5. Kotova O. B. *Adsorbofizicheskie metody obogashcheniya tonkodispersnogo mineralnogo syrya* (Adsorbing and physical methods of concentration of finely dispersed mineral raw materials). Saint Petersburg : Nauka, 2000. 80 p.
6. Kozin V. Z. *Gornyy Zhurnal – Mining Journal*. 2001. No. 4/5. pp. 167–190.
7. Gazaleeva G. I., Orlov S. L., Savin A. G., Zakirnichnyy V. N. *Ekologiya i promyshlennost Rossii – Ecology and industry of Russia*. 2013. No. 1. pp. 13–16.
8. Gazaleeva G. I., Orlov S. L., Sopina N. A., Mushketov A. A., Anashkin V. S., Vishnyakov S. E., Klimentenok G. N., Petrov S. I., Kotova O. B. Vliyaniye veshchestvennogo sostava krasnykh shlamov na tekhnologicheskie pokazateli ikh obogashcheniya (Influence of substantial composition of red muds on technological indexes of their concentration). *Chetvertyy mezhdunarodnyy kongress “Tsvetnye metally – 2012”, Krasnoyarsk* (Forth international congress “Non-ferrous metals – 2012”, Krasnoyarsk). 2012. pp. 128–130.
9. Gazaleeva G. I., Orlov S. L., Mushketov A. A. (I-st), Sopina N. A., Bratygin E. V., Dmitrieva E. G., Anashkin V. S., Klimentenok G. N. Razrabotka tekhnologii obogashcheniya krasnykh shlamov Uralskogo alyuminievogo zavoda (Development of technology of concentration of red muds of Ural Aluminium Plant). *Trudy Mezhdunarodnoy konferentsii “Nauchnye osnovy i praktika pererabotki rud i tekhnogennogo syrya”, Ekaterinburg* (Proceedings of International conference “Scientific basis and practice of processing of ores and anthropogenic raw materials”, Ekaterinburg). 2012. pp. 25–27.
10. Gazaleeva G. I., Shcherbakova Z. Kh., Chervyakov S. A., Ivanova S. P. Sovremennyye metody sverkh-tonkogo izmelcheniya i selektivnogo vozdeystviya na chastitsy rud i tekhnogennykh materialov (Modern methods of ultra-fine grinding and selective influence on the particles of ores and anthropogenic materials). *Mezhdunarodnaya konferentsiya “Plaksinskie chteniya 2012”, Petrozavodsk* (International conference “Plaksin’s readings 2012”, Petrozavodsk). 2012. pp. 158–159.

**Статьи, представленные в журналы Издательского дома «Руда и Металлы»,  
должны удовлетворять следующим требованиям:**

1. Статья, присылаемая в редакцию, должна иметь сопроводительное письмо от организации, в которой работают авторы. Бланк письма можно скачать на нашем сайте.

2. Стандартный объем статьи: 6-8 страниц текста (включая таблицы, библиографический список, рефераты, рисунки). Текст печатается через 1,5 интервала шрифтом Times New Roman 12 кегля.

Материал должен быть изложен кратко, без повторений данных таблиц и рисунков в тексте. На литературу, таблицы и рисунки следует давать ссылки в тексте. Номер литературной ссылки дается в квадратных скобках в соответствующем месте текста.

Рисунки должны быть четкими, пригодными для компьютерного воспроизведения. Не следует перегружать их второстепенными данными, не имеющими прямого отношения к тексту статьи. Цветные фотографии желательно сопровождать подписями. Физические единицы и обозначения необходимо давать в Международной системе единиц СИ.

3. Статья должна иметь не более 5 авторов (остальных принимавших участие в работе можно указать в сноске). На каждого из них должна быть оформлена авторская карточка с указанием места работы, должности, ученой степени, адреса, телефона, электронной почты. Кроме того, следует указать адрес электронной почты одного из авторов. Эти сведения должны быть предоставлены на русском и английском языках.

4. Статья должна быть дополнена аннотацией и ключевыми словами (от 7 до 10) на русском и на английском языках. Аннотация (1600–1800 знаков (с пробелами) как на русском, так и на английском языках) должна достаточно полно раскрыть содержание статьи. В ней должны быть отражены цели и задачи, методы, результаты, область применения результатов, выводы.

5. Каждая статья должна быть снабжена библиографическим списком, включающим не менее 10 ссылок (собственные работы авторов должны составлять не более четверти списка; ссылки на источники от 2000 г. обязательны).

Библиографический список должен содержать ряд обязательных сведений.

♦ Для журнальных статей: фамилию и инициалы автора, название статьи, полное название журнала, год издания, том, номер, страницы начала и конца статьи.

♦ Для книг: фамилия и инициалы автора, название произведения, место издания, издательство (для иностранного источника достаточно указать город), год издания, общее число страниц в книге.

♦ Для статей в сборнике: название сборника, номер выпуска (или тома), место издания, издательство (или издающая организация), страницы начала и конца статьи.

♦ Для интернет-ссылок: название ресурса и публикации, режим доступа. При использовании электронных ресурсов необходимо ссылаться на первоисточник и указывать дату обращения.

6. Библиографический список (в соответствии с требованиями международных баз данных) нужно транслитерировать на латинский шрифт, включая фамилию и инициалы автора, название источника публикации, а технические сокращения (выпуск, том, страница и т. п.) должны быть переведены с использованием общепринятых обозначений.

7. При записи статьи на электронный носитель или пересылке ее по e-mail текстовая часть статьи должна быть записана в отдельный файл, созданный в программах Microsoft Office, Open Office. Тоновые иллюстрации (фотографии) требуется записывать в виде отдельных файлов в формате JPG, TIF, EPS или PSD с достаточным разрешением (не ниже 300 dpi при масштабе 1:1). Графики, технологические схемы, таблицы необходимо предоставлять в той программе, в которой они были созданы (MS Word, MS Excel, OpenOffice).