

О.С. Данилов, А.В. Белов, И.В. Гребенюк

# ПЕРЕРАБОТКА ЗОЛОШЛАКОВЫХ ОТХОДОВ С ИЗВЛЕЧЕНИЕМ РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ КАК КЛЮЧЕВОЙ ФАКТОР СОЦИАЛЬНО- ЭКОНОМИЧЕСКОГО И ЭКОЛОГИЧЕСКОГО БЛАГОПОЛУЧИЯ УГЛЕДОБЫВАЮЩИХ СТРАН

**Аннотация.** Проанализированы перспективы комплексной переработки золошлаковых отходов, как источника высоколиквидного коммерческого ресурса — редких металлов. Рассмотрены возможности применения электромагнитного микроволнового излучения для создания нового эффективного метода извлечения редких и редкоземельных металлов из золошлаковых отходов. Предложено новое химико-технологическое решение по технологическому переделу техногенных отходов, включающее в себя: радиометрическое обогащение отходов, посредством энергосберегающего измельчения геоматериала до дисперсного состояния с использованием импульсного электромагнитного излучения; кислотное вскрытие минеральной матрицы дезинтегрированных отходов, интенсифицированное воздействием постоянного электромагнитного микроволнового излучения. Рассмотренное решение будет способствовать снижению энергетических затрат, уменьшению времени технологического процесса и увеличению выхода готового продукта.

**Ключевые слова:** золошлаковые отходы, редкие и редкоземельные металлы, переработка, электромагнитное микроволновое излучение, радиометрическое обогащение, социально-экономическое благополучие, экология.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-7-0-16-22

Традиционные технологии производства и потребления энергии в угольной теплоэнергетике оказывают негативное влияние на окружающую среду, превращая ресурсы (ископаемый уголь) в источники загрязнения (золошлаковые отходы) и вызывая тем самым значительный экологический ущерб.

Утилизация рассматриваемых отходов крайне актуальна, является важным направлением природоохранных, ресурсосберегающих мер и занимает первоочередное место среди перспективных проблем во многих странах мира.

Ежегодно в мире параллельно с выработкой тепловой и электрической энергии образуется сотни миллионов тонн зол

и шлаков. Признанным лидером их комплексного использования и рециклинга на сегодняшний день является Европейский союз. Из образующихся в отвалах угольных электростанций 60 млн т золошлаковых отходов (ЗШО) страны Евросоюза используют для заполнения вышедших из использования шахт и рудников, а также в цементном производстве, строительстве и многих других отраслях промышленности. Основой заинтересованности промышленников и энергетиков в утилизации и полезном использовании отходов теплоэнергетики в Европе служат как законодательные, так и экономические стимулы. Наиболее крупной компанией на европейском континенте по перера-

ботке золошлаковых отходов является «Bau Mineral» (Германия). Она напрямую интегрирована с энергосистемой страны. Направление ее работы — использование отходов тепловой энергетики в строительной промышленности. Уровень рециклинга золошлаковых отходов в Евросоюзе колеблется от 70 до 100%.

По сравнению с ними в США, Польше и Китае уровень эффективной переработки рассматриваемых отходов и применения их в промышленности достигает 70%. При этом необходимость переработки закреплена на законодательном уровне и нарушители подвергаются значительным штрафным санкциям со стороны государства. В Индии за последние десятилетие наблюдается рост уровня переработки золошлаковых отходов с 30% до 53% [1].

В Российской Федерации на настоящий момент накоплено более 2 млрд т золы и шлаков топливных энергетических станций, при этом прирост отходов составляет 22,5 млн т/год. Из них рециклингу подвергается всего до 3 млн т/год (до 13%). Разработка эффективных методов рециклинга позволит по оценкам авторитетных экспертов мирового уровня повысить использование данных отходов к 2020 г. до 30–50%, а к 2030 г. — до 70% и выйти на общеевропейский уровень обращения с промышленными отходами [2, 3].

В современной промышленности, в настоящий момент, наибольшим спросом пользуются редкие и редкоземельные металлы. Они незаменимы в изготовлении турбин для электростанций, авиастроении, оптике, электротехнике, электронике, в атомном машиностроении, в металлургии и многих других отраслях промышленности.

Следовательно, разработка новых инновационных технологий переработки золошлаковых отходов с извлечением востребованного высоколиквидного про-

дукта — редких металлов является важной научно-практической задачей, позволяющей внести определенный вклад в решение экологических, экономических и социальных задач угледобывающих стран.

Согласно экспериментальной оценке многих исследователей, концентрация редких металлов в золошлаковых отходах может достигать г/т или даже десятков г/т [4].

При этом необходимо отметить, что в отличие от рудного сырья, рассматриваемые отходы представляет собой комплексный ресурс, не требующий финансовых и технологических затрат на извлечение из недр и дезинтеграцию, которые обуславливают значительные издержки промышленных производств.

Рынок редких и редкоземельных металлов является динамично развивающимся, так с 1964 по 1997 г. он увеличился в 17 раз, а с 1997 по 2015 г. — в 20 раз. Потребление редких металлов колеблется от десятков до сотен тысяч тонн в год. Объем рынка — более 15 млрд долл. в год [4].

Редкие металлы являются продукцией, ориентированной в большей степени на экспорт. Основными потребителями являются США, страны Западной Европы, Япония, Южная Корея.

В России практически отсутствует собственное производство редких и редкоземельных металлов, а необходимые объемы для нужд промышленности импортируются (объем импорта данных металлов за 2009–2011 гг. составил около 50 тыс. т) [5].

Основными достоинствами использования золошлаковых отходов тепловой энергетики в качестве альтернативной минерально-сырьевой базы получения редких и редкоземельных элементов являются их повсеместная распространенность, дешевизна и значительные запасы. Несмотря на это, рассматриваемый

геоматериал является сложным и непостоянным по составу, что требует разработки индивидуальных технологических решений, учитывающих региональный метаморфизм исходного топлива и особенности работы теплоагрегатов электростанций. Сами золошлаковые материалы по химическому и минералогическому составу во многом идентичны природному минеральному сырью. В основном они представлены пылевидной фракцией средней класс крупности, которой составляет более 60 мкм. При этом ценные металлы, локализованные в частицах, распределены неравномерно, в сростках с сопутствующими минералами, а также в различных структурных фазах отходов (кристаллической, стекловидной, органической) [6, 7].

Подобные структурные особенности ЗШО требуют разработки подходов, основанных на новых концептуальных технологических решениях, позволяющих с минимальными энергетическими затратами, высоким выходом и селективностью по целевому, извлекаемому коммерческому продукту осуществить технологический передел геоматериала. Таким подходом может на наш взгляд рассматриваться применение энергии электромагнитного микроволнового излучения.

Электромагнитным микроволновым излучением, называют частоты в диапазоне от 300 ГГц до 300 МГц, которые располагаются в интервале между инфракрасными и радиочастотами. Данное излучение обладает следующими уникальными возможностями [8]:

- эффективно дезинтегрировать различные геоматериалы с селективным разрушением сростков минералов и минеральных ассоциатов;

- в десятки и сотни раз ускорять многие химические реакции, а, следовательно, значительно сокращать время, затрачиваемое на получение целевого продукта;

- вызывать быстрый объемный нагрев;

- повышать выход целевого продукта.

Общемировой и практический опыт показывает, что излучение можно эффективно использовать в различных отраслях народного хозяйства (химическая промышленность, горно-обогатительная отрасль, химическое производство и т.д.) для интенсификации различных технологических процессов и повышения экономической эффективности производства [9–11].

Как в стандартной технологической схеме с использованием рудного сырья, так и при обращении с ЗШО требуется эффективное предварительное обогащение исходного геоматериала. Основной задачей при этом является измельчение сопровождающееся дезинтеграцией и раскрытием минеральных комплексов, содержащих целевые минералы. В первом случае (с рудой) можно использовать механические способы разрушения структуры, во втором они практически не применимы и для решения задачи необходимо использование электрических и магнитных свойств минералов, таких как: электрические свойства, магнитная восприимчивость, диэлектрическая проницаемость и т.д.

Среди известных способов предварительного обогащения наиболее эффективным в данном случае является радиометрический метод обогащения, основанный на применении в отношении минерального, в т.ч. техногенного сырья различных видов физических излучений (оптического, рентгеновского, электромагнитного и т.д.).

В научном сообществе, как среди отечественных так и зарубежных ученых рассматриваемый метод обогащения отмечен как весьма перспективный, имеющий широкий спектр применения и значительный потенциал при промышленном применении. Многочисленными

**Эффективность микроволнового нагрева веществ с различной проводимостью  
(частота излучения 2,45 ГГц, мощность 800 Вт)  
Efficiency of microwave heating of substances having different conduction (radiation frequency  
2.45 GHz, wattage 800 W)**

Вещество	Удельное сопротивление, Ом*м	T, °C	Продолжительность нагрева, мин
<b>Оксиды</b>			
SiO <sub>2</sub>	10 <sup>4</sup> –10 <sup>14</sup>	79	7
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10 <sup>4</sup> –10 <sup>14</sup>	78	4
<b>Оксиды со смешанными степенями свободы</b>			
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	10 <sup>-4</sup> –10 <sup>-2</sup>	1258	3
<b>Полупроводники</b>			
PbS	10 <sup>-5</sup> –10 <sup>-3</sup>	956	7
FeS <sub>2</sub>	10 <sup>-5</sup> –10 <sup>-3</sup>	1019	7

ведущими научными учреждениями нашей страны метод успешно испытан в отношении обогащения различных видов минеральных ресурсов. При этом в отношении переработки промышленных отходов радиометрический метод обогащения нашел наибольшее развитие за рубежом, в России же его применение сдерживается недостаточным опытом использования [12].

Представленная научная работа направлена на восполнение этого пробела в аспекте теоретического обоснования эффективного применения радиометрического метода обогащения, с попутным использованием воздействия электромагнитных полей в процессах технологического передела золотшлаковых отходов.

В предлагаемом технологическом решении предлагается использование двух разновидностей электромагнитного микроволнового излучения: импульсного и непрерывного.

На первом этапе — сырье (золотшлаковые отходы) будет дезинтегрировано до максимально дисперсного состояния с использованием импульсного электромагнитного излучения частотой 2450 МГц. Обоснованность и корректность выдвинутого утверждения базируется на основе морфологического строения и электромагнитных свойств органической и

минеральной составляющей техногенных отходов.

В плане морфологии золотшлаковые отходы представляют собой неоднородную смесь кристаллической и аморфной фаз (золы и шлаки), также органической фазы (несгоревший уголь — «недожог»). С химической точки зрения основными минеральными составляющими зол-уноса и шлаков являются оксид кремния, оксид алюминия и оксиды железа, а также сульфиды металлов и иные включения [6].

В таблице избирательно приведены данные об эффективности воздействия электромагнитного микроволнового излучения на ряд химических соединений присутствующих в золотшлаковых отходах [13, 14]. Как можно заключить, учитывая данные приведенные в таблице основными химическими соединениями, активно поглощающими энергию электромагнитного микроволнового излучения в техногенных отходах, являются оксиды и сульфиды железа (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, FeS<sub>2</sub>). На практике многочисленными работами сторонних авторов, например [15, 16] экспериментально установлено, что применение микроволнового излучения для диспергирования позволяет с меньшими энергетическими затратами осуществить более глубокую дезинтеграцию минерального сырья.

Кроме эффекта дезинтеграции непосредственно зол-уноса и шлаков при воздействии микроволнового излучения на «недожог» (несгоревший уголь), происходит его эффективное разрушение [17], с изменением микропористой структуры и увеличения адсорбционной активности [18, 19]. Это положительно повлияет на диффузионные процессы взаимодействия химических реагентов с ЗШО и обеспечит высокую скорость выщелачивания редких металлов.

На втором этапе — диспергированное сырье будет смешано с выщелачивающим агентом с получением раствора. Для интенсификации процесса извлечения металлов на раствор будет воздействовать непрерывное электромагнитное микроволновое излучение частотой 2450 МГц.

Для вскрытия золошлаковых отходов нами рекомендуется применение серной либо азотной кислоты. Выбор сделан на основе величины их диэлектрической проницаемости ( $\epsilon = 84\text{--}100$ ,  $\epsilon = 40\text{--}50$ ) [20], которая непосредственно связана

с эффективностью поглощения химической средой энергии электромагнитного микроволнового излучения. Согласно заключениям авторов работы [21] использование микроволнового излучения позволит, во-первых, получить объемный нагрев смеси, во-вторых, многократное ускорение физико-химических процессов выщелачивания редких металлов из раствора.

На заключительной стадии раствор необходимо подвергнуть механической фильтрации от золошлаковых частиц, с последующим выделением металлов из раствора с помощью электролиза, регулируя параметры воздействия в зависимости от величины электроотрицательности металлов.

Резюмируя работу, можно заключить, что предлагаемое техническое решение по переработке золошлаковых отходов позволит разработать перспективную энергосберегающую технологию получения редких и редкоземельных металлов с использованием электромагнитного микроволнового излучения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Hlopitskiy A.* Study of Complex Recovery of Solid Slag Waste from Thermal Power Plants in the Target Components // *Chemical and Materials Engineering* 3 (1): 1–5, 2015. pp. 1–5. DOI: 10.13189/cme.2015.030101.
2. <http://zoloshlaki.ru/wp-content/uploads/2015/12/Lipatov.pdf> (дата обращения 12.10.16).
3. *Новиков Н. И., Салихов В. А.* Некоторые аспекты экономической оценки техногенных месторождений как перспективного сырья для металлургической промышленности // *Вестник ТГУ.* — 2016. — № 1 (33). — С. 38–53.
4. *Арбузов С. И., Ершов В. В., Рихванов Л. П.* Редкие элементы в углях Кузбасса: монография. — Кемерово, 1999. — 248 с.
5. *Твердохлебова Т. В., Усова Е. А.* Мировой и российский рынок редких металлов: текущее состояние // *Проблемы современной экономики.* — 2011. — № 4 (40). — С. 70–75.
6. *Афанасьева О. В., Мингалеева Г. Р., Добронравов А. Д., Шамсутдинов Э. В.* Комплексное использование золошлаковых отходов // *Известия вузов. Проблемы энергетики.* — 2015. — № 7–8. — С. 26–36.
7. *Мелентьев В. А.* Золошлаковые материалы. — М.: Энергия, 1978. — 255 с.
8. *СВЧ-энергетика. Т. 2.* Применение энергии сверхвысоких частот в промышленности / Под ред. Э. Окресса, Э.Д. Шлиффера. — М.: Мир, 1971. — 255 с.
9. *Meredith R.* Engineers Handbook of Industrial Microwave Heating. London: The Institution of Electrical Engineers, 1998.
10. *Möller M., Waitz R.* Mikrowellen In-Fass Trocknung Effektives Eindampfen von radioaktiven Flüssigabfällen. In *atw* 52. Jg. (2007) Heft 12 — Dezember, S. 807–810, Internationale Zeitschrift für Kernenergie.

11. Бикбулатов И. Х., Даминев Р. Р., Шулаев Н. С., Шулаева Е. А. Применение электромагнитного излучения СВЧ диапазона в химической технологии // Бутлеровские сообщения. — 2009. — Т. 18. — № 8. — С. 1–28.
12. Кобзев А. С. Направления развития и проблемы радиометрических методов обогащения минерального сырья // Обогащение руд. — 2013. — № 1. — С. 13–17.
13. Ford J. D., Pei D. C. T. J. Microwave Power Electromagn. Energy, 2(2), 61 (1967).
14. Wong D. M.Sc.Thesis. University of Alberta, Canada, 1975.
15. Чантурия В. А., Бунин И. Ж., Лунин В. Д., Гуляев Ю. В., Бунина Н. С., Вдовин В. А., Воронов П. С., Корженевский А. В., Черепенин В. А. Использование мощных электромагнитных импульсов в процессах дезинтеграции и вскрытия упорного золотосодержащего сырья // Физико-технические проблемы обогащения полезных ископаемых. — 2001. — № 4. — С. 95–106.
16. Диденко А. Н. СВЧ-энергетика: теория и практика. — М.: Наука, 2003. — 446 с.
17. Долголаптев А. В., Образцов А. П., Нистратов В. Ф., Уварова А. П., Вороновский Ю. Д. Развитие электрофизических способов разрушения // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2003. — № 5. — С. 155–158.
18. Данилов О. С., Михеев В. А., Москаленко Т. В. Исследование влияния электромагнитного излучения СВЧ-диапазона на йодный показатель бурого угля / Материалы международного совещания «Инновационные процессы в технологиях комплексной, экологически безопасной переработки минерального и нетрадиционного сырья» (Плаксинские чтения–2009). — С. 304–305.
19. Данилов О. С., Михеев В. А., Москаленко Т. В. Оценка воздействия электромагнитного микроволнового излучения на микропористую структуру бурого угля // Горный информационно-аналитический бюллетень. ОВ 4 Дальний Восток-1. — 2009. — С. 285–289.
20. <http://rusautomation.ru/dielektricheskaya-pronicaemost> (дата обращения 10.01.2017).
21. Рахманкулов Д. Л., Бикбулатов И. Х., Шулаев Н. М. Микроволновое излучение и интенсификация химических процессов. — М.: Химия, 2003. — 220 с. **ПАБ**

## КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Данилов Олег Сергеевич<sup>1</sup> — кандидат технических наук, научный сотрудник,  
e-mail: dnv.07@mail.ru,

Белов Алексей Викторович<sup>1</sup> — кандидат технических наук, доцент,  
e-mail: poraen@mail.ru,

Гребенюк Игорь Владимирович<sup>1</sup> — менеджер,  
Международный центр технологий обогащения минерального сырья  
и использования вторичных ресурсов, e-mail: igor.grebenyuk@mail.ru,

<sup>1</sup> Дальневосточный федеральный университет.

---

ISSN 0236-1493. Gornyy informatsionno-analicheskiy byulleten'. 2018. No. 7, pp. 16–22.

## Ash and slag waste processing with extraction of rare metals as a key factor of social, economic and ecological well-being in coal mining countries

Danilov O.S.<sup>1</sup>, Candidate of Technical Sciences, Researcher, e-mail: dnv.07@mail.ru,

Belov A.V.<sup>1</sup>, Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor, e-mail: poraen@mail.ru,

Grebenyuk I.V.<sup>1</sup>, Manager, e-mail: igor.grebenyuk@mail.ru,

<sup>1</sup> Far East Federal University, Vladivostok, Russia.

**Abstract.** At the moment, waste of heat power stations is scantily used by the industry in Russia, as a rule, as an additive in production of building materials, while capabilities of this kind of waste are much wider. Accordingly, this waste needs integrated processing. In this article, the prospects of integrated processing of ash and slag waste as the source of highly marketable rare metals are analyzed. Applicability of electromagnetic microwave radiation to creation of a new efficient method for extraction of rare and rare-earth metals from ash and slag waste is discussed. A new chemical-engineering solution is proposed for the mining waste process circuit, including: (1) radiometric processing of waste by energy-saving comminution down to a disperse state by pulsed electromagnetic emission; (2) acid dissociation of mineral matrix of disintegrated waste intensified by continuous electromagnetic microwave radiation. The solu-

tion discussed will facilitate the reduction in power input, shortage of process time and the increase in the finished product yield.

**Key words:** ash and slag waste, rare and rare-earth metals, processing, electromagnetic microwave radiation, radiometric processing, social and economic well-being, ecology.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-7-0-16-22

## REFERENCES

1. Hlopitskiy A. Study of Complex Recovery of Solid Slag Waste from Thermal Power Plants in the Target Components. *Chemical and Materials Engineering* 3 (1): 1–5, 2015. pp. 1–5. DOI: 10.13189/cme.2015.030101.
2. <http://zoloshlaki.ru/wp-content/uploads/2015/12/Lipatov.pdf> (accessed 12.10.16).
3. Novikov N.I., Salikhov V.A. Nekotorye aspekty ekonomicheskoy otsenki tekhnogennykh mestorozhdeniy kak perspektivnogo syr'ya dlya metallurgicheskoy promyshlennosti [Some aspects of the economic assessment of technogenic deposits as a prospective raw material for the metallurgical industry] *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2016, no 1 (33), pp. 38–53. [In Russ].
4. Arbutov S.I., Ershov V.V., Rikhvanov L.P. *Redkie elementy v uglyakh Kuzbassa: monografiya* [Rare elements in coals of Kuzbass: monograph], Kemerovo, 1999, 248 p.
5. Tverdokhlebova T.V., Usova E.A. Mirovoy i rossiyskiy rynek redkikh metallov: tekushchee sostoyanie [World and Russian market of rare metals: current state] *Problemy sovremennoy ekonomiki*. 2011, no 4 (40), pp. 70–75. [In Russ].
6. Afanas'eva O.V., Mingaleeva G.R., Dobronravov A.D., Shamsutdinov E.V. Kompleksnoe ispol'zovanie zoloshlakovykh otkhodov [Complex use of ash and slag wastes]. *Izvestiya vuzov. Problemy energetiki*. 2015, no 7–8, pp. 26–36. [In Russ].
7. Melent'ev V.A. *Zoloshlakovye materialy* [Ash-and-slag materials], Moscow, Energiya, 1978, 255 p.
8. SVCh-energetika. T. 2. Primenenie energii sverkhvysokikh chastot v promyshlennosti. Pod. red. E. Okressa, E.D. Shliffiera [Microwave power, vol. 2. Application of ultrahigh-frequency energy in industry. Okress E., Shliffier E.D. (Eds.)], Moscow, Mir, 1971, 255 p.
9. Meredith R. *Engineers Handbook of Industrial Microwave Heating*. London: The Institution of Electrical Engineers, 1998.
10. Möller M., Waitz R. Mikrowellen In-Fass Trocknung Effektives Eindampfen von radioaktiven Flüssigabfällen. In atw 52. Jg. (2007) Heft 12 Dezember, S. 807–810, *Internationale Zeitschrift für Kernenergie*.
11. Bikbulatov I.Kh., Daminev R.R., Shulaev N.S., Shulaeva E.A. Primenenie elektromagnitnogo izlucheniya SVCh diapazona v khimicheskoy tekhnologii [Application of electromagnetic radiation of microwave range in chemical technology]. *Butlerovskie soobshcheniya*. 2009, vol. 18, no 8, pp. 1–28. [In Russ].
12. Kobzev A.S. Napravleniya razvitiya i problemy radiometricheskikh metodov obogashcheniya mineral'nogo syr'ya [Directions of development and problems of radiometric methods of mineral dressing]. *Obogashchenie rud*. 2013, no 1, pp. 13–17.
13. Ford J.D., Pei D.C.T. *Microwave Power Electromagn. Energy*, 2(2), 61 (1967).
14. Wong D. M. Sc. Thesis. *University of Alberta*, Canada, 1975.
15. Chanturiya V.A., Bunin I.Zh., Lunin V.D., Gulyaev Yu.V., Bunina N.S., Vdovin V.A., Voronov P.S., Korzhenevskiy A.V., Cherepenin V.A. Ispol'zovanie moshchnykh elektromagnitnykh impul'sov v protsessakh dezintegratsii i vskrytiya upornogo zolotosoderzhashchego syr'ya [Use of powerful electromagnetic pulses in processes of disintegration and opening of persistent gold-containing raw materials]. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy obogashcheniya poleznykh iskopaemykh*. 2001, no 4, pp. 95–106. [In Russ].
16. Didenko A.N. *SVCh-energetika: teoriya i praktika* [Microwave power: theory and practice], Moscow, Nauka, 2003, 446 p.
17. Dolgolaptev A.V., Obratsov A.P., Nistratov V.F., Uvarova A.P., Voronovskiy Yu. D. Razvitiye elektrofizicheskikh sposobov razrusheniya [Development of electrophysical methods of destruction]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2003, no 5, pp. 155–158. [In Russ].
18. Danilov O.S., Mikheev V.A., Moskalenko T.V. Issledovanie vliyaniya elektromagnitnogo izlucheniya SVCh-diapazona na yodnyy pokazatel' burogo uglya [Investigation of the effect of electromagnetic radiation of the microwave range on the iodine value of brown coal]. *Materialy mezhdunarodnogo soveshchaniya «Innovatsionnye protsessy v tekhnologiyakh kompleksnoy, ekologicheskoy bezopasnoy pererabotki mineral'nogo i netraditsionnogo syr'ya» (Plaksinskie chteniya–2009)*, pp. 304–305. [In Russ].
19. Danilov O.S., Mikheev V.A., Moskalenko T.V. *Otsenka vozdeystviya elektromagnitnogo mikrovolnovogo izlucheniya na mikroporistuyu strukturu burogo uglya* [Evaluation of the effect of electromagnetic microwave radiation on the microporous structure of brown coal]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. Special edition 4. 2009, pp. 285–289. [In Russ].
20. <http://rusautomation.ru/dielektricheskaya-pronicaemost> (accessed 10.01.2017).
21. Rakhmankulov D.L., Bikbulatov I.Kh., Shulaev N.M. *Mikrovolnovoe izluchenie i intensivatsiya khimicheskikh protsessov* [Microwave radiation and the intensification of chemical processes], Moscow, Khimiya, 2003, 220 p.