

**О.С. Данилов, А.В. Белов, А.В. Андреев,  
И.В. Гребенюк, Ю.Д. Одинцова**

## **ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ЭФФЕКТИВНОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ ФИЗИКО- МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МИНЕРАЛЬНОЙ МАТРИЦЫ УГОЛЬНЫХ ШЛАМОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ТЕРАГЕРЦОВЫХ ЧАСТОТ В АСПЕКТЕ ИХ КОМПЛЕКСНОГО РЕЦИКЛИНГА**

На основе анализа современного состояния науки и техники в области прорывных технологий переработки углеродсодержащих материалов предложено использование уникальных свойств электромагнитного излучения терагерцовых частот для комплексного рециклинга отходов угледобычи. Эффективность применения данного вида силового воздействия подкреплена необходимыми доводами, построенными на обобщении и анализе результатов исследования российских и зарубежных авторов, а также собственных разработок.

Ключевые слова: угольные шламы, рециклинг, электромагнитное излучение терагерцовых частот, минеральная матрица, трансформация.

**В** настоящее время эффективным базисом, который может поддержать стабильное функционирование и дать импульс к развитию экономики и промышленности является рациональное использование имеющейся ресурсной базы, сбалансированный и технологически обоснованный переход к ресурсо- и энергосберегающим технологиям.

ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. № 8. С. 231–237.  
© 2016. О.С. Данилов, А.В. Белов, А.В. Андреев, И.В. Гребенюк, Ю.Д. Одинцова.

Основой рационального природопользования является ресурсосбережение — система мер, направленная на комплексное использование природных и техногенных ресурсов, снижение нерациональных отходов производства и рециклинг вторичных ресурсов, с целью их эффективного использования для улучшения экологии и повышения конкурентоспособности современной промышленности России.

Утилизация золошлаковых отходов (ЗШО) в тепловой электроэнергетики актуальна и занимает первоочередное место среди перспективных проблем во многих странах мира. На настоящий момент отходы теплоэнергетики (сотни млн т) в России весьма незначительно используются в разных отраслях производства, однако их потенциал огромен.

Рост эффективности технологических процессов извлечения ценных компонентов из ЗШО возможен за счет:

- формирования новых методов и аппаратов разделительных процессов, адаптивных к техногенному сырью, обеспечивающих интергранулярное раскрытие тонкодисперсных минеральных комплексов;

- селективное извлечение с получением товарных продуктов на основе экспрессной прогнозной минералого-технологической оценки различных видов техногенного сырья, осуществляемой современным комплексом методов минералогического анализа.

Кроме того широкомасштабная реализация потенциала ЗШО возможна путем их целенаправленного модифицирования (в том числе посредством силовых физических полей), направленного на усиление контрастности их физических и физико-механических свойств отходов, необходимого для повышения эффективности использования ЗШО в разнообразных технологических переделах.

Следовательно, исследования, направленные на выявление новых явлений и закономерностей влияния электромагнитного микроволнового излучения терагерцового диапазона на структуру и свойства техногенных отходов, являются весьма актуальной научно-технической задачей.

Российская Федерация является одной из крупнейших угледобывающих стран мира. Соответственно, количество золошлаковых отходов в золоотвалах на территории России составляет десятки и сотни млн т. Ископаемые угли обладают высоким полиметалльным потенциалом.

Например, в угольных месторождениях Дальнего Востока наблюдаются весьма высокие концентрации германия (0,1—

1,0 масс. %), скандия (0,23 масс. %). Содержание золота составляет в среднем 0,302 г/т. Помимо этого в углях присутствуют бериллий, тантал, ниобий. В золе и шлаках, как концентраторов элементов, содержание данных металлов в несколько раз и даже кратно выше [1]. Для их эффективного использования требуется разработка прорывных научных методов вторичного использования (рециклинга).

В настоящее время одним из наиболее перспективных методов трансформации и преобразования диэлектрических и полупроводниковых геоматериалов, в т.ч. при их рециклинге является применение электромагнитного излучения.

Оно получило достаточно широкое распространение для решения различных научных и практических задач и эффективно используется в химической, горнорудной, угольной и многих других отраслях промышленности, положительно влияя на их технико-экономические показатели, позволяя формировать новые энерго- и ресурсосберегающие технологии.

Электромагнитное микроволновое излучение лежит в диапазоне частот от 300 МГц до 300 ГГц. Наиболее изученной областью в научной сфере и промышленном применении является микроволновое излучение частот 915 МГц и 2450 МГц. Эффекты, возникающие при использовании излучения на приведенных частотах, подробно изучены, опубликованы и внедрены.

Наименее изученным в научном и технологическом плане (особенно в области взаимодействия с твердыми горючими ископаемыми) является электромагнитное излучение терагерцовых частот. Данное излучение включает в себя коротковолновую часть излучения, весь субмиллиметровый и дальний (длинноволновой) ИК-диапазоны длин волн и располагается в частотном диапазоне от 0,3 до 10 ТГц, с длиной волны от 1 мм до 30 мкм.

Терагерцовый диапазон частот является весьма привлекательным для широкого круга фундаментальных и прикладных исследований в области физики, химии, и др. в силу ряда своих специфических особенностей, таких как: низкая ионизирующая способность, сильное поглощение водой, высокая проникающая способность в диэлектрические материалы. [2].

Национальные программы использования терагерцового излучения созданы в США, Японии и Европе. В настоящее время ведутся интенсивные исследования процессов взаимодействия ТГц-излучения с полимерами, древесиной, сверхпроводящими пленками, керамикой, метаматериалами [3–9].

Как общеизвестно, твердые горючие ископаемые, в т.ч. ископаемые угли состоят из минеральной и органической составляющей. Экспериментально установлена возможность эффективной трансформации органической составляющей ряда твердых топлив (торф, бурый уголь, каменные угли) под действием электромагнитного излучения частотой 2450 МГц [10].

Минеральная часть твердых горючих ископаемых и продуктов их обогащения (угольных шламов) является ресурсным базисом и предпосылкой для их вовлечения в процессы рециклинга. Минеральная матрица содержит в себе до 150 минералов в составе кристаллической и стекловидной фаз. Основными минералами выступают метасиликаты, ферриты, алюминаты, шпинели, алюмоферриты. Часто отмечаются рудные минералы, такие как: вольфрамит, касситерит, станин и др. Большой интерес представляют различные самородные элементы и интерметаллиды: платина, серебро, золото и др. [11].

Вопросам использования электромагнитного излучения в области целенаправленной переработки минеральной матрицы твердых топлив и их отходов посвящено весьма ограниченное число работ.

Анализ и обобщение результатов сторонних авторов по данной тематике позволяет сформулировать предпосылки эффективного применения электромагнитного излучения терагерцовых частот для эффективного изменения физико-механических свойств минеральной матрицы угольных шламов:

1. Нижняя часть спектра терагерцовых частот (300 МГц) лежит в верхней сверхвысокочастотной области электромагнитного излучения. Экспериментально установлено [12], что при воздействии электромагнитного микроволнового излучения на горную породу, в т.ч. твердые горючие ископаемые, которая содержит как рудные минералы, так и пустую породу, нагрев первых происходит значительно интенсивнее. Нагрев в свою очередь приводит к возникновению термомеханических напряжений в породе и изменению ее физико-механических свойств.

2. Деформация твердых тел под воздействием электромагнитных полей, проявляющаяся в электропластическом разупрочняющем эффекте в металлах. Эффект возникает благодаря интегральному действию трех основных факторов: «электронного ветра» [13], пинч-эффекта [14] и спинового разупрочнения металла [15].

Таким образом, резюмируя материалы, представленные в работе можно сделать заключение о том, что предлагаемая тема-

тика имеет достаточные научные предпосылки, и ее результаты будут востребованы.

Они будут способствовать эффективной реализации одной из областей рационального природопользования, а именно: «Разработке технологий эффективной переработки твердых полезных ископаемых, включая энергосберегающую комплексную переработку труднообогатимого природного и техногенного минерального сырья с высокой степенью концентрации минеральных комплексов».

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Угольные месторождения России. Том V. Книга 1. Угольные бассейны и месторождения Дальнего Востока (Хабаровский край, Амурская область, Приморский край, Еврейская АО). – М.: ЗАО Геоинформмарк, 1997. – 371 с.

2. Lee Y.-S. Principles of Terahertz Science and Technology. Springer, (2009). – P. 340.

3. Fisher B. M., Wietzke S., Reuter M., Peters O., Gente R., Jansen C., Vieweg N., Koch M. Investigating material characteristics and morphology of polymers using terahertz technology // Transactions of Terahertz Science and Technology. 2013. – Vol.3, No 3. – P. 259–268.

4. Jin Y. S., Kim G. J., Jeon S. G. Terahertz dielectric properties of polymers // Journal of Korean Physics Society. – 2006. – Vol.49, No2. – P. 513–517.

5. Todoruk T. M., Hatrley I. D., Reid M. W. Origin of birefringence in wood at terahertz frequencies // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology. – 2012. – Vol.2. No1. – P. 123–130.

6. Pracht U. S., Heintze E., Clauss C., Hafner D., Bek R., Werner D., Gelhorn S., Scheffler M., Dressler M., Sherman D., Gorshunov B., Henrich D., Siegel M. Electrodynamic of the superconducting state in ultra-thin films at THz frequencies // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology. – 2013. – Vol. 3, No 3. – P. 269–280.

7. Takano K., Yakiyama Y., Shibuya K., Izumi K., Miyamaru H., Kitahara H., Hanguyo M. Fabrication and performance of TiO<sub>2</sub> – ceramic – based metamaterials for terahertz frequency range // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology. 2013. – Vol. 3, No 6. – P. 812–819.

8. Withayachhumnankul W., Abbott D. Metamaterials in the Terahertz regime // IEEE Photonics Journal. – 2009. – Vol. 1, No 2. – P. 99–118.

9. H.-T. Chen, Teylor A. J., Averitt R. D. Complementary planar terahertz metamaterials // Optics Express. – 2007. – Vol. 15, No 3. – P. 1084–1095.

10. Данилов О. С., Михеев В. А., Москаленко Т. В. Исследование влияния электромагнитного микроволнового излучения на твердые горючие ископаемые // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2011. – Т. 13, №1(5). – С. 1264–1267.

11. Черепанов А. А., Янчев В. К., Сулейманов С. Л. Использование золашлаковых отходов ТЭЦ в строительстве // Энергетическая эффективность. – 2013. – №5. – С. 64–69.

12. Диденко А. Н., Зверев Б. В. СВЧ-энергетика. – М.: Наука, 2000. – 400 с.

13. Багаутдинов А. Я., Громов В. Г., Головин Ю. И., Троицкий О. А. и др. Структура и свойства перспективных металлических материалов. — Томск: НТЛ, 2007. — 575 с.

14. Спицын В. И., Троицкий О. А. Моделирование теплового и спич-эффекта импульсного тока на пластическую деформацию металла // ДАН СССР, 1975. — № 5. — С. 1070–1073.

15. Molotskii M. Plasticity of ferromagnets near the curie point // Philosophical Magazine B. — 2003. — V. 83. — № 12. — P. 1421–1430. **VIAS**

#### 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,

*Андреев Андрей Владимирович*<sup>1</sup> — кандидат технических наук, доцент, e-mail: aandreevmining@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,

*Одинцова Юлия Дмитриевна*<sup>1</sup> — студент, инженерная школа, e-mail: yulya...sweet@list.ru,

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

Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2016. No. 8, pp. 231–237.

UDC  
662.654.1:  
537.868

**O.S. Danilov, A.V. Belov, A.V. Andreev, I.V. Grebenyuk,  
Yu.D. Odintsova**

### **THEORETICAL BACKGROUND OF THE TRANSFORMATION EFFICIENCY PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF COAL SLURRIES MINERAL MATRIX USING ELECTROMAGNETIC RADIATION IN THE TERAHERTZ FREQUENCIES ASPECTS OF THEIR INTEGRATED RECYCLING**

In the present review paper based on the analysis of the current state of science and technology in the field of advanced technologies of processing carbonaceous materials proposed the use of the unique properties of the electromagnetic radiation of terahertz frequencies for comprehensive recycling of coal mining. The effectiveness of this type of impact force is supported by the necessary arguments built on a synthesis and analysis of the results of the study of Russian and foreign authors, as well as their own development.

Key words: coal sludge, recycling, electromagnetic radiation of terahertz frequencies, mineral matrix transformation.

#### AUTHORS

*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,  
Andreev A.V.<sup>1</sup>, Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor,  
e-mail: aandreevmining@mail.ru,  
Grebenyuk I.V.<sup>1</sup>, Manager, International Center for Technology of Mineral Processing  
and Use Secondary Resources, e-mail: igor.grebenyuk@mail.ru,  
Odintsova Yu.D.<sup>1</sup>, Student, School of Engineering, e-mail: yulya...sweet@list.ru,  
<sup>1</sup> Far Eastern Federal University (FEFU), 690950, Vladivostok, Russia.

## REFERENCES

1. *Ugol'nye mestorozhdeniya Rossii*. Tom V. Kniga 1. Ugol'nye basseyny i mestorozhdeniya Dal'nego Vostoka (Khabarovskiy kray, Amurskaya oblast', Primorskiy kray, Evreyskaya AO) (Coal deposits in Russia, vol. V, book 1. Coal basins and deposits of the Far East (Khabarovsk Territory, the Amur region, Primorsky Krai, the Jewish Autonomous Region)), Moscow, ZAO Geoinformmark, 1997, 371 p.
2. Lee Y.-S. *Principles of terahertz science and technology*. Springer, 2009. P. 340.
3. Fisher B. M., Wietzke S., Reuter M., Peters O., Gente R., Jansen C., Vieweg N., Koch M. Investigating material characteristics and morphology of polymers using terahertz technology. *Transactions of Terahertz Science and Technology*. 2013, vol. 3, no 3, pp. 259–268.
4. Jin Y. S., Kim G. J., Jeon S. G. Terahertz dielectric properties of polymers. *Journal of Korean Physics Society*. 2006, vol. 49, no 2, pp. 513–517.
5. Todoruk T. M., Hatrley I. D., Reid M. W. Origin of birefringence in wood at terahertz frequencies. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. 2012, vol. 2, no 1, pp. 123–130.
6. Pracht U. S., Heintze E., Clauss C., Hafner D., Bek R., Werner D., Gelhorn S., Scheffler M., Dressler M., Sherman D., Gorshunov B., Henrich D., Siegel M. Electrodynamic of the superconducting state in ultra-thin films at THz frequencies. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. 2013, vol. 3, no 3, pp. 269–280.
7. Takano K., Yakiyama Y., Shibuya K., Izumi K., Miyamaru H., Kitahara H., Hangyo M. Fabrication and performance of TiO<sub>2</sub> ceramic based metamaterials for terahertz frequency range. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. 2013, vol. 3, no 6, pp. 812–819.
8. Withayachhumnankul W., Abbott D. Metamaterials in the Terahertz regime. *IEEE Photonics Journal*. 2009, vol. 1, no 2, pp. 99–118.
9. Chen H.-T., Teylor A. J., Averitt R. D. Complementary planar terahertz metamaterials. *Optics Express*. 2007, vol. 15, no 3, pp. 1084–1095.
10. Danilov O. S., Mikhhev V. A., Moskalenko T. V. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*. 2011, vol. 13, no 1(5), pp. 1264–1267.
11. Cherepanov A. A., Yanchev V. K., Suleymanov S. L. *Energeticheskaya effektivnost'*. 2013, no 5, pp. 64–69.
12. Didenko A. N., Zverev B. V. *SVCh-energetika* (Microwave energy), Moscow, Nauka, 2000, 400 p.
13. Bagautdinov A. Ya., Gromov V. G., Golovin Yu. I., Troitskiy O. A. *Struktura i svoystva perspektivnykh metallicheskiykh materialov* (Structure and Properties promising metallic materials), Tomsk, NTL, 2007, 575 p.
14. Spitsyn V. I., Troitskiy O. A. *Doklady Akademii nauk of USSR*, 1975, no 5, pp. 1070–1073.
15. Molotskii M. Plasticity of ferromagnets near the curie point. *Philosophical Magazine B*. 2003. V. 83, no 12, pp. 1421–1430.