

УДК 622.74

**КОМПЛЕКСНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КУЗНЕЦКИХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УГЛЕЙ
ПРИ МНОГОСТУПЕНЧАТОЙ ПОДГОТОВКЕ
К СЖИГАНИЮ И УТИЛИЗАЦИИ ОТХОДОВ**

Б. А. Анферов, Л. В. Кузнецова

*Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН,
E-mail: b.anferov@icc.kemsc.ru, просп. Ленинградский, 10, 650065, г. Кемерово, Россия*

В Кузбассе некоторые угли являются рудоносными и должны использоваться комплексно не только как топливо, но и перерабатываться в направлении более полного извлечения ценных компонентов из золошлаковых отходов. Предложено создать производственный комплекс, включающий угледобывающее предприятие, тепловую электрическую станцию с многоступенчатой подготовкой угля к сжиганию и предприятие по переработке отходов: очаговых остатков, газообразных продуктов в виде продуктивного раствора, золы уноса.

Рядовой уголь, сжигание, пылевоздушная смесь, разделение потоков, золошлаковые отходы, ценные химические элементы, рудный концентрат, утилизация

DOI: 10.15372/FTPRPI20190210

Одна из задач научно-технологического развития России — внедрение систем комплексной и глубокой переработки минерального сырья для разделения полезных ископаемых на конечные продукты с извлечением максимального количества полезных компонентов, что обеспечит эффективность переработки полезных ископаемых и сократит объемы отходов производства [1, 2]. Доступным альтернативным источником минерального сырья являются отходы сжигания угля, а именно золошлаковые материалы, содержащие стратегические металлы [3–9].

Геохимические исследования Ленинского, Соколовского и Ерунаковского угольных месторождений Кузбасса, проведенные в Институте угля ФИЦ УУХ СО РАН в 2012 г., показали, что отходы сжигания углей могут рассматриваться в качестве сырья для получения ценных минеральных продуктов [10]. Большой интерес представляют энергетические угли марки Д пласта 67, разрабатываемого шахтой “Талдинская-Западная 1”. Взято 7 угольных проб в Восточном магистральном штреке из борозд по всей мощности пласта с интервалом 0.6 м. Главные компоненты золы рассчитывались по объединенной пробе. Содержания 71 химического элемента определялись инструментальным нейтронно-активационным, масс-спектральным с индуктивно связанной плазмой, атомно-абсорбционно-спектроскопическим, хронопотенциометрическим и инверсионно-вольтамперометрическими методами. Установлена промышленная кондиционность на извлечение основных компонентов золы: оксида алюминия Al_2O_3 — 27.89%, диоксида титана TiO_2 — 1.2% и ценных химических элементов-примесей со средним содержанием в золошлаковом материале, г/т: золота Au — 0.26; галлия Ga — 38.9; гафния Hf — 10.73; иридия Ir — 0.021; палладия Pd — 0.11; осмия Os — 0.147; рения Re — 0.364 [10].

В 2017 г. на шахте “Талдинская-Западная 1” при разработке пласта 67 добыто 5 млн т угля с зольностью 4.92 %. В отходах сжигания содержание Al_2O_3 и TiO_2 составило > 70 т, а также > 12 т ценных химических элементов, концентрации которых удовлетворяют современным промышленным кондициям на извлечение, и обладают более высокой стоимостью, чем уголь (табл. 1) [10]. Сопоставление возможной выручки от реализации рядового угля и ценных компонентов, извлеченных из золошлаковых отходов, показывает упущенную выгоду 630 млн руб.

ТАБЛИЦА 1. Содержание химических элементов в годовом объеме добычи угля

Элемент, компонент	Добыча, кг	Примерная цена реализации, тыс. руб./кг	Примерный объем реализации, млн руб.
Уголь	$5 \cdot 10^9$	0.0013	6500.0
Au	64.00	2000.0	127.9
Ga	9569.40	20.0	191.4
Hf	2638.80	68.0	179.4
Ir	5.17	1200.0	6.2
Pd	27.06	1500.0	40.6
Os	36.11	1800.0	65.0
Re	88.56	145.0	12.8
Al_2O_3	68609.40	0.085	5.8
TiO_2	2952.00	0.140	0.4

Выделить относительно небольшую часть угля как сырье для извлечения ценных компонентов можно при разработке пласта с помощью селективной выемки. Однако исследованиями не выявлено преимущественного районирования ценных химических элементов ни по мощности, ни по простиранию пласта, что исключает возможность применения селективной выемки [11]. Осуществить разделение угля валовой добычи на конечные продукты с достижением не только положительного эффекта при его сжигании, но и с извлечением максимального количества полезных компонентов из отходов возможно в рамках производственного комплекса предприятий, расположенного в непосредственной близости к месту добычи угля. Предприятия осуществляют добычу угля, его сжигание для выработки тепловой и электрической энергии и переработку отходов.

МНОГОСТУПЕНЧАТАЯ ПОДГОТОВКА УГЛЯ К СЖИГАНИЮ И УТИЛИЗАЦИЯ ОТХОДОВ

Ценные химические элементы и компоненты, содержащиеся в угольном веществе пласта 67, по-разному ведут себя при сжигании в топках котельных агрегатов. В зависимости от способа сжигания одни химические элементы покидают топку котла с газообразными продуктами сгорания — дымовыми газами, другие — концентрируются в очаговых остатках (шлак) (табл. 2) [12].

ТАБЛИЦА 2. Физико-технические характеристики химических элементов и компонентов, содержащихся в угольном веществе пласта 67

Элемент, компонент	Плотность, кг/м ³	Температура плавления, К	Поведение при сжигании, %			
			в факеле		в слое	
			Шлак	Унос	Шлак	Унос
Ga	5904	303	2–3	97–98	16–28	72–84
Pd	12010	1827	100	—	100	—
Hf	13310	2506	100	—	100	—
Os	22610	3306	—	100	—	100
Ir	22610	2739	100	—	100	—
Au	19320	1337	50	50	50	50
Re	21020	3463	2–4	96–98	2–4	96–98
TiO_2	4230	2143	95	5	95	5
Al_2O_3	3990	2044	95	5	95	5

В промышленно развитой Кемеровской области ощущается дефицит электроэнергии в объеме 5–8 млрд кВт·ч, который покрывается закупкой в соседних областях, где ее вырабатывают больше, чем потребляют (Красноярский край). Удовлетворить потребности в электроэнергии позволит строительство тепловой электростанции (ТЭС), работающей на углях, добываемых в Ерунаковском геолого-экономическом районе Кузбасса, в этом случае транспортная составляющая цены топлива будет минимизирована. Запасы энергетического угля категорий А + В + С₁ района составляют > 25 млрд т.

При работе ТЭС на угле пласта 67 при сжигании 5 млн т/год может быть выработано (при удельном расходе 0.35 кг на 1 кВт·ч) до 14 млрд кВт·ч электроэнергии (табл. 3, этап 1). При этом оборудование станции может быть настроено не только на обеспечение выработки тепловой и электрической энергии, но и на выделение сырья для извлечения ценных компонентов, содержащихся в рядовом угле (рисунок).

ТАБЛИЦА 3. Материальный баланс сжигания угля на ТЭС и переработки золошлаковых отходов

Этап	Продукт	Содержание ценных компонентов, г/т	
1. Поставка угля пласта 67 с шахты "Талдинская-Западная-1" на ТЭС	Рядовой уголь (масса 5 млн т)	Ga	1.900
		Pd	0.005
		Hf	0.500
		Os	0.007
		Ir	0.001
		Re	0.002
		Au	0.013
		Al ₂ O ₃	13.720
		TiO ₂	0.590
2. Пылеприготовление, включая переизмельчение угольной пыли и ее гравитационную сепарацию для выделения рудного концентрата	Рудный концентрат (масса 50 тыс. т)	Pd	0.542
		Hf	52.776
		Os	0.722
		Ir	0.103
		Re	1.771
		Au	1.280
	Угольная пыль (масса 4.95 млн т)	Ga	1.933
		Al ₂ O ₃	13.720
		TiO ₂	0.590
3. Сжигание угольной пыли в факельном прямоточном процессе	Зола уноса (масса 221 тыс. т)	Ga	43.300
	Шлак энергетического котла (масса 24.6 тыс. т)	Al ₂ O ₃	2789.000
		TiO ₂	120.000
4. Сжигание гранул рудного концентрата в низкотемпературном кипящем слое	Обогащенный рудный концентрат (масса 1.97 тыс. т)	Pd	13.770
		Hf	1340.854
		Ir	2.591
		Au	32.520
	Зола уноса (масса 492 т)	Re	180.000
		Os	73.400
5. Переработка отходов сжигания, производство товарного продукта	Шлак от сжигания гранул обогащенного рудного концентрата	Масса ценных элементов/компонентов, кг	
		Pd	27.100
		Hf	2638.800
		Ir	5.100
	Продуктивный раствор	Au	64.000
		Re	88.600
	Зола уноса	Os	36.100
		Ga	9569.400
	Шлак от сжигания угольной пыли	Al ₂ O ₃	68609.400
		TiO ₂	2952.000
	Отходы переработки	Строительные материалы	137·10 ⁶

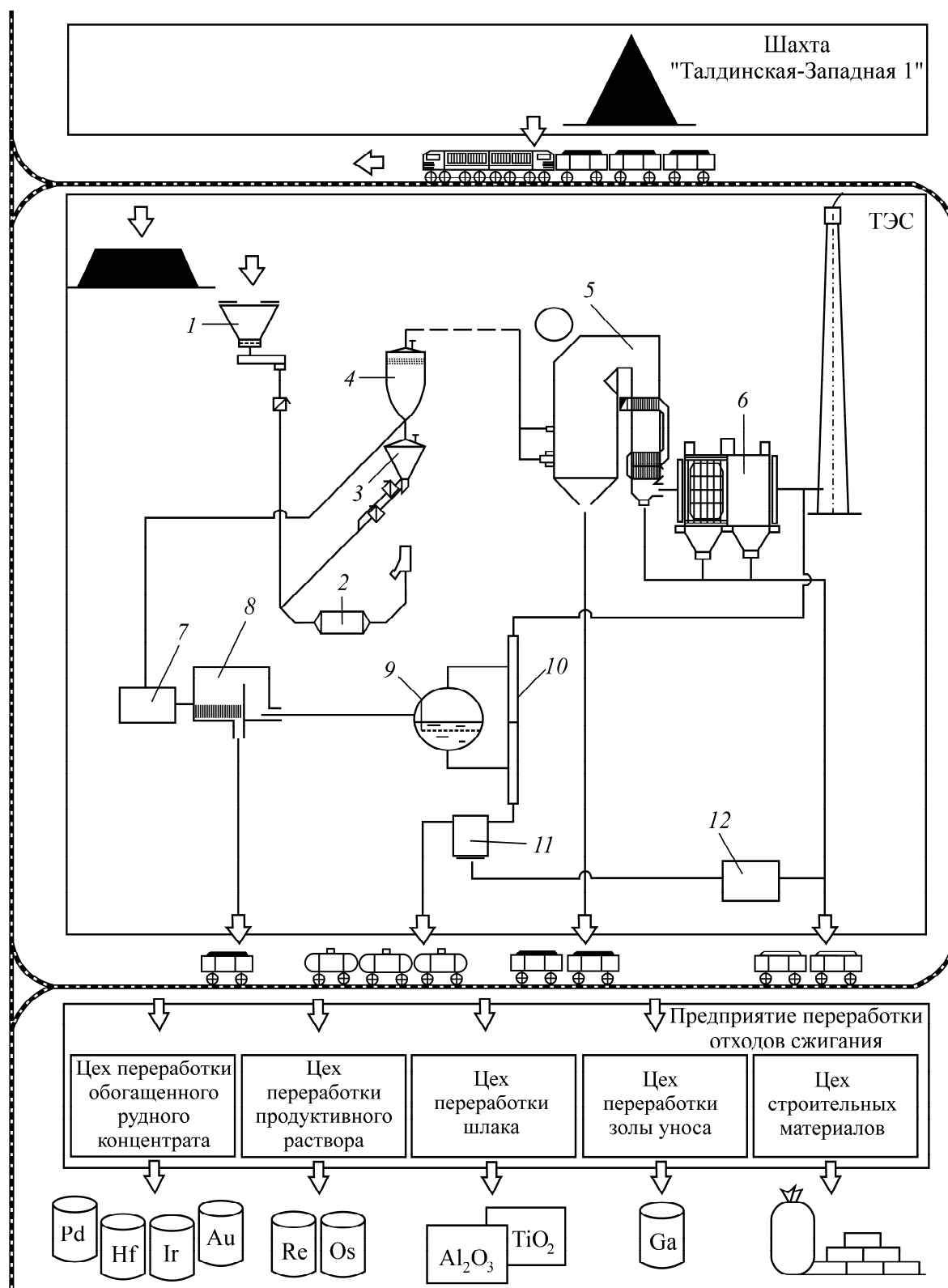


Схема производственного комплекса "шахта–ТЭС–предприятие по утилизации отходов": 1 — бункер сырого угля; 2 — мельница; 3 — сепаратор инерционный; 4 — сепаратор гравитационный; 5 — котельный агрегат высокого давления; 6 — электрофильтр; 7 — участок гранулирования рудного концентрата; 8 — водогрейный котел с топкой кипящего слоя; 9 — горизонтальная емкость; 10 — циклон; 11 — осадитель; 12 — осушитель

Современные энергетические котельные агрегаты, вырабатывающие водяной пар высокого давления, например ТП-87-1 (Е 420-14-560-Ж), комплектуются двумя системами пылеприготовления с промежуточным бункером.

На этапе 2 (табл. 3) проводится многоступенчатое пылеприготовление. Рядовой уголь размалывают в шаровой барабанной мельнице до крупности зерен 50–250 мкм. Готовность пыли для сжигания на первой ступени контролируют по крупности зерен сепаратором центробежного типа, пропуская через него пылевоздушную смесь, выходящую из мельницы. Частицы пыли с размерами, превышающими заданный диапазон, выводятся сепаратором из общего потока пылевоздушной смеси и направляются обратно в мельницу на домол, образуя второй поток угольной пыли, отличный от основного по количественному и качественному составу.

Крупность частицы угольной пыли влияет на время ее сгорания в топке котельного агрегата, которое в силу ограниченности геометрических размеров топочного пространства не может быть более регламентированного. Но для выделения угольных частиц с повышенными содержаниями ценных химических элементов такое деление по крупности не подходит. Ценные химические элементы могут содержаться как в крупных частицах угольной пыли, так и в мелких. Для выделения из общего потока пылевоздушной смеси частиц пыли с повышенным содержанием ценных химических элементов необходимо на второй ступени осуществить деление по плотности.

Химические элементы Pd, Hf, Os, Ir, Au, Re обладают плотностью, превышающей плотность угля и пустой породы в 10 раз и более, а плотность Ga, TiO₂ и Al₂O₃ лишь в 2 раза превышает плотность пород, вмещающих угольный пласт. Содержание ценных химических элементов в угле относительно мало, но с уменьшением геометрических размеров частиц влияние их содержания на массу частицы возрастает. Для выделения из общего потока угольной пыли сырья с повышенным содержанием ценных химических элементов необходимо обеспечить переизмельчение угольной пыли и осуществить ее сепарацию по плотности частиц.

Переизмельчение угольной пыли может быть осуществлено на действующем оборудовании системы пылеприготовления котельного агрегата, вырабатывающего пар высокого давления, в частности путем настройки центробежного сепаратора на пропуск более мелкой пыли. Для сепарирования угольной пыли по плотности используется гравитационный сепаратор, установленный в системе пылеприготовления сразу после центробежного. Его настраивают на пропуск частиц угольной пыли меньшей плотности, в том числе с Ga, TiO₂ и Al₂O₃, и выведение из общего потока рудного концентрата частиц с повышенной плотностью. Степень переизмельчения пыли и режим работы гравитационного сепаратора определяют опытным путем.

Угольная пыль, прошедшая гравитационный сепаратор и содержащая Ga, TiO₂ и Al₂O₃, направляется в бункер энергетического котла и далее на сжигание в камерной топке в факельном прямоточном процессе (табл. 3, этап 3). При сжигании угольной пыли в факеле весь Ga покидает топку котла с газообразными продуктами сгорания топлива, а в конвективной части котла он концентрируется на частицах золы уноса [12]. TiO₂ и Al₂O₃ концентрируются в очаговых остатках — шлаке. При этом улавливается 221 тыс. т золы уноса и образуется 24.6 тыс. т шлака.

Дымовые газы после котла направляют для очистки в электрофильтр, обладающий высоким КПД (0.98–0.99) по улавливанию золовых частиц (рисунок). Зола уноса является сырьем для извлечения Ga, который может быть реализован в качестве готового товарного продукта.

Шлак, выведенный из топки энергетического котла, представляет собой рудный концентрат с повышенным содержанием TiO_2 и Al_2O_3 . Он также может быть реализован в качестве готового товарного продукта.

Рудный концентрат (до 50 тыс. т), полученный на этапе 2 и выведенный из гравитационного сепаратора, кроме угля содержит Pd, Hf, Os, Ir, Au и Re. Из этого концентрата на ТЭС пресуют топливные гранулы с геометрическими размерами 5–10 мм, которые сжигают в низкотемпературном кипящем слое водогрейного котла (или промышленного котла), выполняющего на ТЭС роль пикового подогревателя питательной воды для котла высокого давления.

На этапе 4 для сжигания гранул в топке низкотемпературного кипящего слоя обеспечивают двукратный избыток подаваемого воздуха (по сравнению с теоретически необходимым) и температуру в слое 800 ± 50 °С. При таких условиях сжигания Pd, Hf, Ir, Au останутся в очаговых остатках — в шлаке, а Os, Re в виде химических соединений (окислов) покинут топку котла с газообразными продуктами сгорания — дымовыми газами вместе с золой уноса массой 492 т (табл. 3) [13, 14].

Газообразные продукты сгорания направляют в горизонтальную емкость, до половины заполненную водным раствором щелочи типа NaOH (рисунок). В этой емкости газообразные продукты сгорания гранул контактируют с водным раствором щелочи путем ввода их под уровень погружного перфорированного щита; температура снижается до значений ниже температуры конденсации соединений рения. Далее раствор, содержащий соединения рения и осмия (продуктивный раствор), может быть реализован как товарный продукт для получения рения, например электролизом, и осмия — восстановлением до металла.

Очаговые остатки, образующиеся в топке низкотемпературного кипящего слоя после сжигания гранулированного рудного концентрата, содержат повышенные концентрации Pd, Hf, Ir и Au (обогащенный рудный концентрат до 2 тыс. т). Этот концентрат также реализуют как товарный продукт предприятию, где методами гидрометаллургии получают перечисленные металлы.

Полученные на этапах 3 и 4 отходы сжигания (очаговые остатки, продуктивный раствор, зола уноса) направляют на предприятие для их переработки. На этапе 5 при выделении ценных химических элементов и компонентов также получают отходы, которые содержат сырье для изготовления строительных материалов до 137 млн т (табл. 3).

ВЫВОДЫ

Выявлено, что энергетический уголь пласта 67 Ерунаковского месторождения содержит в промышленных кондициях основные компоненты золы — оксид алюминия и диоксида титана, а также ценные химические элементы-примеси — золото, галлий, гафний, иридий, палладий, осмий, рений для их извлечения. Разделение энергетического угля валовой добычи на конечные продукты целесообразно осуществлять в рамках производственного комплекса предприятий по добыче угля, его сжиганию для выработки тепловой и электрической энергии и переработке отходов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Прогноз** научно-технологического развития России: 2030 / под ред. Л. М. Гохберга. — М.: Министерство образования и науки РФ, Нац. исследовательский ун-т НИУ “Высшая школа экономики”, 2014. — 244 с. URL: https://prognoz2030.hse.ru/data/2014/12/25/1103939133/Prognoz_2030_final.pdf (дата обращения 17.05.2017).
2. **Анферов Б. А. и др.** Состояние и перспективы развития проектов государственно-частного партнерства в контексте комплексного освоения недр / под ред. А. Э. Конторовича, С. М. Никитенко, Е. В. Гоосен. — Кемерово: Сиб. изд. группа, 2015. — 331 с.

3. **Золошлаковые отходы.** Ч. 2. Экономическая выгода от переработки. Как заработать на золе? // ИХТЦ Химические технологии. 20.10.216. URL: <http://ect-center.com/blog/zoloshlakovie-othody-2> (дата обращения 02.03.2018.)
4. **Зырянов В. В., Зырянов Д. В.** Зола уноса — техногенное сырье. — М.: ООО ИПЦ “Маска”, 2009. — 319 с.
5. **Мингалеева Г. Р., Шамсутдинов Э. В., Афанасьева О. В., Федотов А. И., Ермолаев Д. В.** Современные тенденции переработки и использования золошлаковых отходов ТЭС и котельных // Современные проблемы науки и образования. — 2014. — № 6. URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=16475> (дата обращения: 28.02.2018).
6. **Yao Z. T., Xia M. S., Sarker P. K., Chen T.** A review of the alumina recovery from coal fly ash, with a focus in China, *Fuel*, 2014, Vol. 120. — P. 74–85.
7. **Tolhurst L.** Commercial recovery of metals from coal ash, World of Coal Ash (WOCA) Conference in Nashville, TN, May 5–7, 2015.
8. **Roth E., Macala M., Lin R., Bank T., Thompson R., Howard B., Soong Y., and Granite E.** Distributions and extraction of rare earth elements from coal and coal by-products, World of Coal Ash (WOCA) Conference in Lexington, KY, May 9–11, 2017.
9. **Bojinova D. and Teodosieva R.** Extraction of elements from coal fly ash using thermo-hydrometallurgical method, *J. Chemical Technology and Metallurgy*, 2016, Vol. 51, No. 5. — P. 577–587.
10. **Нифантов Б. Ф., Артемьев В. Б., Ясюченя С. В., Анферов Б. А., Кузнецова Л. В.** Геохимическое и геотехнологическое обоснование новых направлений освоения угольных месторождений Кузбасса. Сер.: Библиотека горного инженера. — М.: Горное дело ООО “Киммерийский центр”, 2014, Т. 1. Геология. Кн. 4. — 536 с.
11. **Клишин В. И., Анферов Б. А., Кузнецова Л. В.** Селективная разработка угольных пластов с ценными химическими элементами // Горн. журн. — 2017. — № 9. — С. 71–76.
12. **Юдович Я. Э., Кетрис М. П.** Ценные элементы-примеси в углях. — Екатеринбург: УрО РАН, 2006. — 538 с.
13. **Пат. 2391508 РФ.** Способ комплексного освоения угольного месторождения / Б. А. Анферов, Л. В. Кузнецова; заявл. 06.03.2009 // Оpubл. в БИ. — 2010. — № 16. — 6 с.
14. **Пат. 2448250 РФ.** Способ комплексного освоения месторождения энергетических углей / Б. Ф. Нифантов, Б. А. Анферов, Л. В. Кузнецова; заявл. 07.10.2010 // Оpubл. в БИ. — 2012. — № 11. — 8 с.

Поступила в редакцию 23/V 2018

После доработки 23/V 2018

Принята к публикации 26/III 2019