

6. Пивняк Г.Г. Post mining: технологический аспект решения проблемы/ Г.Г. Пивняк, А.Н. Шашенко, П.И. Пилов, М.С. Пашкевич // Труды международного симпозиума „Неделя горняка - 2012“: Сборник статей. Отдельный выпуск Горного Информационно-аналитического бюллетеня (научно-технического журнала) Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal). – М.: Горная книга. – 2012. – №0В1. – С. 20–31.

7. Півняк Г.Г. Synchro-mining: цивілізоване вирішення проблеми сталого функціонування гірничодобувних регіонів / Г.Г.Півняк, П.І.Пілов, М.С.Пашкевич, Д.О.Шашенко // Науковий вісник НГУ. – 2012. - №3. – С. 131-138.

8. С.В.Бурылов, В.А.Дзензерский, В.Ю.Скосарь, С.В.Тарасов. Применение ветроустановок и аккумуляторов для решения энергетических и экологических вопросов использования земных недр [Электронный ресурс] // Научный вестник Московского Государственного Горного Университета, 2013. - № 2 (35). - С. 64-71. – Режим доступа к журн.: <http://vestnik.msmu.ru/authors/author500.html#>

9. Ветряки могут защитить от ураганов / Раздел сайта «Технологии» [Электронный ресурс] // Режим доступа к публикации: <http://telegraf.com.ua/tehnologii/1153677-vetryaki-mogut-zashhitit-ot-uraganov-video.html>

10. Луговской С.А., Лаврентьев И.А., Савилов С.И., Балашов А.Л. Современные отечественные абсорбенты для аминной очистки технологических и природных газов [Электронный ресурс] / М/н форум «Топливо-энергетический комплекс: региональные аспекты», 8-11 апреля 2003, С-Пб // Режим доступа к публикации: [http://www.himsorbent.ru/res/site/pdf\\_docs/doklad20.pdf](http://www.himsorbent.ru/res/site/pdf_docs/doklad20.pdf)

11. Новые технологии BAYER получения серной кислоты [Электронный ресурс] / Аналитический портал химической промышленности. – Режим доступа к публикации: [http://www.newchemistry.ru/printletter.php?n\\_id=5442](http://www.newchemistry.ru/printletter.php?n_id=5442)

12. Голицын М.В. Мир солнечного камня: Сегодня и завтра ископаемого угля / М.В.Голицын, А.М.Голицын. – М.: Жизнь и мысль, 2010. – 224 с.

УДК 622.33; 622.82; 622.272; 631.41

## УГЛЕЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ И ПЕРЕРАБОТКА УГОЛЬНОГО ШЛАКА

**В.А. Дзензерский**, доктор технических наук, профессор, заведующий отделом сверхпроводящих магнитных систем, директор Института Институт транспортных систем и технологий НАН Украины «Трансмаг», г. Днепропетровск, Украина, e-mail: [itst@westa-inter.com](mailto:itst@westa-inter.com)

**А.А. Буряк**, научный сотрудник отдела сверхпроводящих магнитных систем Институт транспортных систем и технологий НАН Украины «Трансмаг», г. Днепропетровск, Украина, e-mail: [alexander.buryak@gmail.com](mailto:alexander.buryak@gmail.com)

**В.Ю. Скосарь**, кандидат физико-математических наук, ст. научный сотрудник отдела электротехнических комплексов транспортных средств Институт транспортных систем и технологий НАН Украины «Трансмаг», г. Днепропетровск, Украина, e-mail: [svu@westa-inter.com](mailto:svu@westa-inter.com)



**Аннотация.** Предложено направление в решении задач энергообеспечения и ресурсосбережения путем интегрирования углеэнергетического предприятия и завода по переработке угольного шлака.

*Ключевые слова:* энергообеспечение, ресурсосбережение, углеэнергетическое предприятие, переработка угольного шлака, аккумуляторный завод.

## THE COAL-BASED ENERGY PLANT AND THE TREATMENT COAL DROSS

**V. Dzenzersky**, Doctor of technical Science, Professor, Head of the Department of Superconducting Magnetic Systems, Head of The Institute  
Institute of Transport System and Technologies NAS of Ukraine "Transmag", Dnepropetrovsk, Ukraine, e-mail: [itst@westa-inter.com](mailto:itst@westa-inter.com)

**A. Buryak**, Scientific Researcher of Department of Superconducting Magnetic Systems  
Institute of Transport System and Technologies NAS of Ukraine "Transmag", Dnepropetrovsk, Ukraine, e-mail: [alexander.buryak@gmail.com](mailto:alexander.buryak@gmail.com)

**V. Skosar**, Candidate of physical-mathematical Science, Scientific Researcher of electrotechnical complexes means of transport  
Institute of Transport System and Technologies NAS of Ukraine "Transmag", Dnepropetrovsk, Ukraine, e-mail: [svu@westa-inter.com](mailto:svu@westa-inter.com)

**Abstract.** A solution to the energy-supply and resource-saving problems is proposed based on the integration of the coal-based power plants and plants for treatment coal dross.

*Keywords:* energy-supply and resource-saving problems, coal energy concern, treatment coal dross, accumulator works.

**Введение.** Создание углеэнергетических предприятий высокого технологического уровня является одним из перспективнейших решений задач энергообеспечения и ресурсосбережения. Во-первых, это обусловлено гораздо более богатыми запасами угля, чем других горючих ископаемых (нефти, газа); во-вторых, переработка угля на углеэнергетических предприятиях позволяет не только производить электроэнергию (э/э), но также использовать содержащиеся в угле минеральные составляющие (угольный шлак) и серу, которые ранее рассматривались как примеси [1]. Очевидно, что для Украины это – первоочередные задачи. Опытно-промышленные установки первых углеэнергетических предприятий были реализованы в США, после чего по их типу стали создавать аналогичные проекты в Китае и Индии. Для нас может представлять интерес проект «Вэбэш Ривер» (Wabash River) стартовавший в штате Индиана (США), - углеэнергетическое предприятие мощностью 265 МВт э/э, ориентированное на переработку

угля с высоким содержанием серы и золы за счет его газификации. Новейшая технология дает следующие преимущества: прямые выбросы сернистого газа уменьшаются на 99%, оксидов азота – на 95% по сравнению с обычной ТЭС [1, 2]. Побочными продуктами таких технологий являются жидкая сера и угольный шлак.

Однако, вывод углеэнергетических предприятий на режим полноценной работы пока что сталкивается с определенными трудностями, особенно, если требуется улавливание углекислого газа от сжигания топливного газа. Так, проект в штате Иллинойс, предусматривающий улавливание углекислого газа, столкнулся с проблемой депонирования углекислого газа, причем предложенные решения по его закачке в подземные пласты значительно удорожали технологию, делая ее нерентабельной. Между тем, именно удаления углекислого газа из газовых выбросов, как главного виновника парникового эффекта, требуют «лобби зеленых» в США и др. развитых странах. Потому строительство новых углеэнергетических предприятий в США было временно прекращено [3].

Хотя углеэнергетические предприятия еще не достигли необходимой рентабельности с учетом требований по снижению выбросов парниковых газов, но зато заметно превосходят традиционные угольные ТЭС по другим параметрам области энергетики и экологии. Можно указать на следующие основные преимущества: высокий интегральный КПД (минимизация потерь ресурсов), существенно меньшие выбросы в атмосферу сернистого газа и оксидов азота, лучшие условия труда работников (за счет применения новейшего оборудования), а также возможность получать побочные продукты стабильного качества, пригодные для использования некоторыми потребителями. Речь идет, во-первых, о сере и об угольном шлаке, который могут использовать строительные предприятия. Во-вторых, о топливном газе и о паре высокого давления, часть которых могут найти применение не только в пределах углеэнергетического предприятия. Потому в ряде стран поднимаются вопросы о строительстве углеэнергетических предприятий (и даже ведутся соответствующие работы) на тех или иных месторождениях угля с учетом их специфики и хозяйственных потребностей регионов и стран, например, в Китае, в Российской Федерации (в Сибири и на Дальнем Востоке), в Австралии, в Казахстане и др. [1, 4].

И еще один важный аспект комплексной экологической политики. Угольная промышленность во многих странах, в том числе, в Украине вынуждена применять комплекс инженерно-технических мер на закрытых и закрывающихся шахтах для обеспечения охраны окружающей среды, извлечения запасов полезных ископаемых инновационными способами, а также вводить совокупность экономических и социальных мер на депрес-

сивной территории – post-mining. Новым научным вкладом можно считать разработку концепции предупреждения всех перечисленных проблем горнодобывающей промышленности, которую предложено обозначить понятием synchro-mining. В случае synchro-mining речь идет об активных инженерно-технических, экономических и социальных мероприятиях в зоне угольных разработок и всей окружающей территории еще на стадии проектирования и начала эксплуатации месторождений, и вплоть до их закрытия [5, 6].

К мероприятиям по извлечению запасов полезных ископаемых на старых шахтах инновационными способами можно отнести углубленную переработку угля, шахтного метана и отходов углеобогащения на месте их добычи путем производства тепловой и электрической энергии. Ведь на шахтах и обогатительных фабриках скопились сотни миллионов тонн отходов углеобогащения, которые сформировали обширные территории шламохранилищ. Эти отходы фактически представляют собой горючее ископаемое с большой зольностью, которое или требует обогащения перед сжиганием или применения новейших технологий газификации, приспособленных под угли высокой зольности [7].

Представляется актуальным такое направление решения задач энергообеспечения и ресурсосбережения, которое включает:

- создание углеэнергетических предприятий, перерабатывающих высокозольные угли и отходы углеобогащения, и производящих э/э;
- выгодное использование побочных продуктов переработки (минеральных составляющих, серы) на производстве, интегрированном с углеэнергетическим предприятием.

#### **Цель работы.**

Предложить решение задач энергообеспечения и ресурсосбережения на пути интегрирования углеэнергетического предприятия в районе шахт или больших шламохранилищ с заводом по переработке угольного шлака.

#### **Материал и результаты исследований.**

Нами предлагается следующее решение: создание и размещение углеэнергетического предприятия по типу «Вэбэш Ривер» вблизи угольных шахт (сернистый уголь с высоким содержанием золы) или больших шламохранилищ, и сопряжение с ним завода по переработке угольного шлака в строительные материалы. Таким образом, переработка угольного шлака будет обеспечена э/э, тепловой энергией и серной кислотой. Углеэнергетическое предприятие мощностью 265 МВт, способное ежедневно перерабатывать 2544 тонн сернистых или высокосернистых углей средней или высокой зольности, окажется подходящим для углей Донецкого бассейна Украины (и РФ), или бурых углей с большим количеством серы и золы

Днепровского бассейна Украины (и Подмоскoвнoгo бассейна РФ). При использовании высокосернистых углей произведенного объема серной кислоты может быть достаточно не только для переработки угольного шлака, но и для снабжения второго товарoпроизвoдящегo завода – аккумуляторного производства мощностью 7 млн. свинцово-кислотных аккумуляторных батарей в год (19178 штук в сутки), как, например, аккумуляторное производство МНПК «ВЕСТА», г. Днепропетровск. На углеэнергетическом предприятии добывают уголь, газифицируют его, топливный газ сжигают в газовой турбине, полученный пар высокого давления подают на паровые турбины, на электрогенераторах вырабатывают э/э, которую подают во внешнюю электросеть и на завод по переработке угольного шлака в строительные материалы (а также на аккумуляторный завод). Завод по переработке угольного шлака интегрирован с углеэнергетическим предприятием в единый комплекс. На рис. 1 представлена схема углеэнергетического предприятия и интегрированного с ним завода по переработке шлака. Углеэнергетическое предприятие включает шахту или шламохранилище (не показаны), кислородный завод 1, накопитель угля 2, углепомольную установку и пульвосмеситель 3, камеры газификации 4, магистраль 5 выхода топливного газа (смеси водорода, угарного газа и метана, а также газов-примесей), теплообменник-охладитель 6 топливного газа, циклонный пылеочиститель топливного газа (не показан), сероулавливател 7, магистраль 8 передачи пара, магистраль 9 передачи топливного газа, высоковольтные электрогенераторы 10, 11 с приводами от паровой 12 и газовой 13 турбин, ЛЭП 14, парогенератор 15, магистраль 16 подачи воды, узел вывода шлака 17.

Рядом с сероулавливателем 7 размещен блок 18 синтеза и накопления серной кислоты. Блок 18 с помощью трубопровода 19 снабжает завод 20 по переработке угольного шлака и аккумуляторный завод (не показан). Преобразователи энергии разделены на две группы – на высоковольтную для выдачи э/э во внешнюю энергосеть через ЛЭП 14, и на низковольтную трехфазную. Последняя группа включает паровую турбину 22, служащую приводом для электрогенератора 23, который через электролинию 21 обеспечивает э/э завод 20 по переработке угольного шлака и аккумуляторный завод.

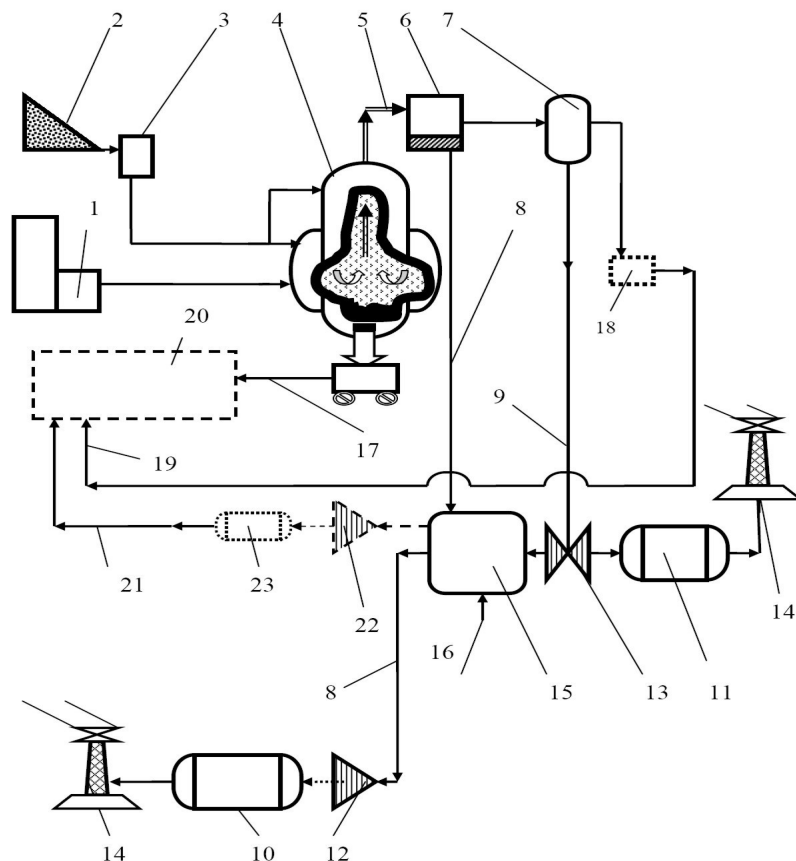


Рис. 1 – Схема углеэнергетического предприятия и интегрированного с ним завода по переработке шлака

Возможны два основных варианта интегрирования углеэнергетического предприятия с заводом по переработке угольного шлака (и аккумуляторным заводом): 1) углеэнергетическое предприятие вырабатывает э/э с избытком, и этот избыток передает во внешнюю электросеть; 2) добыча угля и производство э/э ограничены и рассчитаны только на внутренних потребителей – товарпроизводящие предприятия, инфраструктуру и жилой массив для работников. Во втором варианте стоит обратить внимание на такие преимущества: отсутствуют потери э/э, неизбежные при передаче на большие расстояния; добычу угля можно вести низкими темпами, например, на бедных месторождениях. В нашей разработке часть горячего пара, вырабатываемого на углеэнергетическом предприятии, можно подавать для целей отопления товарпроизводящим предприятиям и жилому массиву.

Важным преимуществом нашей разработки является использование побочных продуктов углеэнергетического предприятия: угольного шлака и серы. Мы предлагаем из серы топливного газа, входящей в газ в виде сероводорода, синтезировать серную кислоту для завода по переработке

угольного шлака (и аккумуляторного завода). Сероводород топливного газа может быть уловлен известными аминными способами абсорбции, а серная кислота может быть синтезирована из сероводорода известным методом «мокрого катализа». Угольный шлак – минеральная негорючая компонента - неизбежно образуется как при обычном сжигании угля, так и при его газификации. Особенно много шлака будет получаться при переработке шламохранилищ, поскольку они являются отходами углеобогащения. Углеэнергетическое предприятие отличается выгодным преимуществом: характеристики и качество угольного шлака будут относительно стабильны за счет единой технологии переработки угля на одном предприятии, связанном с одним месторождением. Тогда как при сжигании угля на различных ТЭС или использовании угля на промышленных предприятиях характеристики и качество угольного шлака будут сильно варьироваться в зависимости от типа оборудования и сорта сырья. Такое положение дел усложняет и затрудняет обработку угольного шлака ввиду большого разброса его характеристик. В нашем предложении характеристики угольного шлака могут быть достаточно стабильны за счет единого техпроцесса газификации угля и его химического состава, что позволит унифицировать технологические заводские циклы. Результатом переработки может стать производство строительной керамики, цемента, бетона, каменного литья, пористых заполнителей, зольного гравия, материалов для дорожного покрытия и пр. Но использование в строительной промышленности шлака сдерживается таким негативным фактором, как избыток радиоактивных изотопов в сопутствующей минеральной породе. Например, в угольных шлаках Донбасса наблюдается значительное содержание радиоактивных тория, калия, радия и даже цезия. При избытке радиоактивных изотопов и непродуманном применении такого угольного шлака, например, в бетонах, возможен вариант, когда наступит многократное превышение среднего допустимого по СНГ значения фона излучения от строительных материалов. Понятно, что в жилых зданиях и производственных помещениях, где будет использован подобный строительный материал, образуется повышенный радиационный фон [8].

Поэтому мы предлагаем дезактивировать угольный шлак за счет выщелачивания радиоактивных элементов серной кислотой. Дезактивацию предлагается осуществлять в несколько стадий. Поскольку частицы шлака в значительной мере могут пассивироваться слоем стекла, образующегося при высоких температурах газификации, то это уменьшает гидросорбцию материалов, содержащих соединения тория, калия, радия и цезия. Потому необходимо произвести помол угольного шлака, что разрушит защитный слой стекла и создаст «рваную» форму частиц шлака, а это, в свою оче-



редь, существенно увеличит удельную поверхность частиц и способность шлака к химическим реакциям с водными растворами серной кислоты. В качестве оборудования для помола можно подобрать известные агрегаты типа шаровых мельниц, вибромельниц или прочих измельчителей, которые широко представлены на рынке. Грануляцию помола угольного шлака нужно подбирать, исходя из условий экономии энергозатрат на помол и ограничения времени просачивания раствора серной кислоты через слой шлака, а также из требования эффективности вывода радиоактивных изотопов. Первоначально мы предлагаем проводить грануляцию частиц шлака до величины 12-15% (остаток на сите № 008 - размер ячейки в свете 0,08 мм). После помола угольный шлак необходимо подвергнуть выщелачиванию раствором серной кислоты в смесителях в условиях непрерывного перемешивания. Условия выщелачивания: температура смеси шлака и кислоты 18-90°C; концентрация раствора серной кислоты 50-200 г/л; соотношение массы угольного шлака и объема раствора 1 : 4-7 г/мл; времена перемешивания 3-5 ч, как в патенте РФ [9], при этом должна быть достигнута степень выщелачивания радиоактивных элементов 69-89%. После выщелачивания обработанный угольный шлак отделяют от раствора, шлак направляют на строительный завод, входящий в состав промышленного комплекса, а раствор концентрируют и направляют предприятиям, которые извлекают из него редкие, редкоземельные и радиоактивные элементы, как описано в патенте РФ [9]. В качестве оборудования для выщелачивания и перемешивания шлака можно подобрать реакторы-смесители для химической промышленности; для отделения угольного шлака от раствора можно использовать тканевые фильтры; для концентрации использованного раствора можно использовать выпариватели, концентраторы для химической промышленности и смежных областей. Все указанное оборудование широко представлено на рынке.

Проведем предварительную оценку целесообразности предложенного решения. В качестве примера возьмем за основу свойства углей Донецкого бассейна с 3% серы и 15% золы [10]. При переработке тонны угля будет выделено 30 кг серы, из которой получено ок. 90 кг серной кислоты (100%), и 150 кг шлака. Возьмем для выщелачивания шлака минимальное количество серной кислоты, т.е. при минимальной концентрации 50 г/л и минимальном расходе 4 мл на 1 г шлака (диапазон величин см. выше). Тогда для обработки 150 кг шлака достаточно 30 кг серной кислоты (100%-ой). Остальное количество кислоты (60 кг) можно направить на аккумуляторный завод. Для изготовления одной свинцово-кислотной батареи типа 6СТ-60А3 с электролитом необходимо потратить 1,925 кг серной кислоты. Углеэнергетическое предприятие перерабатывает ежедневно 2544 т угля.



Полученной серной кислоты хватает на выщелачивание всего шлака и производство свыше 66 тыс. батарей в сутки, что в 3 раза превосходит мощность аккумуляторного завода. И так, вырабатываемой э/э (265 МВт) и серной кислоты с избытком хватает для товаропроизводящих заводов (порядка 25 МВт), так что львиную долю электроэнергии можно отдавать в региональную энергосеть.

**Вывод.** Авторами предложен путь решения задач энергообеспечения, ресурсосбережения за счет интегрирования углеэнергетического предприятия и товаропроизводящих заводов. В качестве примера предложено интегрировать углеэнергетическое предприятие на углях Донецкого бассейна Украины (или РФ) с заводом по переработке угольного шлака и производством свинцово-кислотных аккумуляторов. В перспективе планируется сосредоточить внимание на разработках в области эффективного использования шахтного метана в автономном промышленном энергопарке.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Воробьев Б.М. Уголь мира / Под общей редакцией Л.А.Пучкова. – М.: Изд-во «Горная книга», Изд-во МГГУ, 2007. – Т.1: Глобальный аспект. – 309 с.
2. Перспективы развития угольной отрасли в мире / Сайт «Металлургический бюллетень РФ» [Электронный ресурс] // Режим доступа к публикации: <http://www.metalbulletin.ru/publications/2992/>
3. Чистый уголь: проблемы внедрения технологии [Электронный ресурс] / Всеукраинская газета профсоюза работников угольной промышленности «Шахтер Украины» – 2009. – Режим доступа к публикации: <http://shu.prupu.org/post/4242/>
4. Пучков Л.А. Углеэнергетические комплексы будущего / Л.А.Пучков, Б.М.Воробьев, Ю.Ф.Васючков - М.: Изд-во Московского государственного горного университета, 2007. – 245 с. [Электронный ресурс] // Режим доступа к публикации: <http://do.rulitru.ru/v364/?cc=7&view=pdf>
5. Пивняк Г.Г. Post mining: технологический аспект решения проблемы/ Г.Г. Пивняк, А.Н. Шашенко, П.И. Пилов, М.С. Пашкевич // Труды международного симпозиума „Неделя горняка - 2012“: Сборник статей. Отдельный выпуск Горного Информационно-аналитического бюллетеня (научно-технического журнала) Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal). – М.: Горная книга. – 2012. – №0В1. – С. 20–31.
6. Півняк Г.Г. Synchro-mining: цивілізоване вирішення проблеми сталого функціонування гірничодобувних регіонів / Г.Г.Півняк, П.І.Пілов, М.С.Пашкевич, Д.О.Шашенко // Науковий вісник НГУ. – 2012. - №3. – С. 131-138.
7. Булат А.Ф. Перспективы создания энергетических комплексов на базе угледобывающих предприятий / А.Ф.Булат, И.Ф. Чемерис // Уголь Украины. – 2006. - №2. - С. 3-6.
8. Хоботова Э.Б., Уханева М.И., Сапада А.В., Белай С.Ю. Радиационно-химическая оценка угольных шлаков [Электронный ресурс] / Сайт [www.rusnauka.com](http://www.rusnauka.com). – Режим доступа к публикации: [http://www.rusnauka.com/20\\_PRNiT\\_2007/Chimia/23966.doc.htm](http://www.rusnauka.com/20_PRNiT_2007/Chimia/23966.doc.htm)

9. Пат. 2138339 РФ, МПК7 В03В 9/06; С04В 7/28, 18/10. Способ подготовки золы-уноса от сжигания углей для использования в производстве строительных материалов / Борбат В.Ф.; Адеева Л.Н.; Нечаева О.А.; Михайлов Ю.Л.; Заявитель и патентообладатель Омский государственный университет. – № 98107053/03; заявл. 06.04.1998; опубл. 27.09.1999. – Режим доступа: <http://ru-patent.info/21/35-39/2138339.html>

10. Голицын М.В. Мир солнечного камня: Сегодня и завтра ископаемого угля / М.В.Голицын, А.М.Голицын. – М.: Жизнь и мысль, 2010. – 224 с.

УДК 621.311.24 + 621.314

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОРИСТОГО ФОСФИДА ИНДИЯ В КАЧЕСТВЕ ПОДЛОЖЕК СУПЕРКОНДЕНСАТОРОВ – НОВОЕ СЛОВО В ЗЕЛЕННОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ**

**Я.А. Сычикова**, кандидат физико-математических наук, старший преподаватель кафедры методики преподавания физико-математических дисциплин и информационных технологий в обучении

Бердянский государственный педагогический университет, г. Бердянск, Украина, e-mail: [yanasuchikova@mail.ru](mailto:yanasuchikova@mail.ru)

**Аннотация.** В работе рассмотрена возможность применения пористого фосфида индия в качестве материала для создания суперконденсаторов. Предложен метод получения пористых слоев фосфида индия и проанализирована морфология поверхности полученных наноструктур.

*Ключевые слова:* суперконденсатор, пористый фосфид индия, электрохимическое травление, электролит, поры, источники энергии.

## **THE USE OF POROUS INDIUM PHOSPHIDE AS SUBSTRATES SUPERCAPACITORS – NEW WORD IN GREEN ENERGY**

**Y. Suchikova**, candidate of physical and mathematical sciences, senior lecturer teaching techniques of physical and mathematical sciences and information technologies in teaching Berdyansk State Pedagogical University, Berdyansk, Ukraine, e-mail: [yanasuchikova@mail.ru](mailto:yanasuchikova@mail.ru)

**Abstract.** The paper considers the possibility of using porous indium phosphide as a material to create supercapacitors. Proposed a method of obtaining porous layers of indium phosphide and analyzed the surface morphology of the obtained nanostructures.

*Keywords:* supercapacitor porous indium phosphide, electrochemical etching, electrolyte pores energy sources.

**Введение.** Суперконденсаторы представляют интерес для хранения энергии в гибридных электрических устройствах, питающихся от аккумуляторов в связи с их высокой удельной мощностью, отличной обратимостью и большой циклической жизнью по сравнению с батареями. Исследования