

## Раздел третий

### ОБРАЩЕНИЕ С ЗОЛОШЛАКАМИ

#### 3.7. Аналитические материалы

##### 3.7.10. Влияние новых технологий сжигания угля на типы и свойства золошлаков

*Т. Цигельски, Polish CCP Union, Варшава, Польша*  
*Я. Хицнар, ECOCOAL Consulting Center, Катовице, Польша*

#### АННОТАЦИЯ

Необходимость снижения выбросов  $\text{CO}_2$  в атмосферу оказывает существенное влияние на развитие и использование различных источников энергии, и решение этой проблемы является единственным способом существования практически всех стран мирового сообщества. Уголь до настоящего времени являлся самым дешевым источником тепловой и электрической энергии, но при его сжигании образуется максимальное количество  $\text{CO}_2$ , что требует совершенствования существующих технологий сжигания и развития новых.

С одной стороны, пылеугольное сжигание и сжигание в котлах с механической топкой становятся все лучшими технологиями, а сжигание в кипящем слое находит всё большее применение, с другой стороны, энергично развиваются технологии совместной газификации топлив и производства электроэнергии, а также технологии кислородного сжигания топлива. Все эти мероприятия направлены на увеличение тепловой эффективности энергетических процессов и устранение негативного влияния процессов сжигания угля на окружающую среду, а также сжигания смеси угля с другими альтернативными видами топлив.

Это приведет к появлению новых типов побочных продуктов сжигания угля с новым составом и физико-химическими свойствами. В результате непрерывной деятельности по НИОКР выявлена высокая ценность и потенциал использования этих новых побочных продуктов, как минеральных материалов, так и строительных изделий.

Проекты НИОКР в области использования побочных продуктов в экономике, складываемых в прошлом на отвалах, продолжают вместе с непосредственной утилизацией побочных продуктов, образующихся в настоящее время в результате использования новых разработанных технологий сжигания. Отмеченный рост объемов использования побочных продуктов сжигания угля вызван не только экономическими аспектами и тщательным менеджментом природных сырьевых материалов, но также обусловлен недавно введенным законодательством по выбросам  $\text{CO}_2$ .

#### УГОЛЬ В ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ БАЛАНСЕ

При анализе баланса первичных энергоносителей наблюдается постоянное снижение доли угля, в то время как абсолютные объемы добычи и использования угля возрастают. В большинстве прогнозов на 21 век отмечено, что нынешняя доля угля в энергетическом балансе будет оставаться неизменной, что в практическом плане означает увеличение потребления угля на 2,5 % ежегодно. Некоторые прогнозы, особенно относящиеся к периоду после 2030 года, описывают значительный рост роли угля в энергообеспечении, как показано на рис. 1.

В то время, как в энергобалансе 2006 г. доля угля составляла 25 %, и 40 % электрической энергии вырабатывалось за счет сжигания угля, в период с 2006 г. до 2030 г. потребление каменного угля возрастет с 5,370 до 10,560 ... 12 млрд т [1].

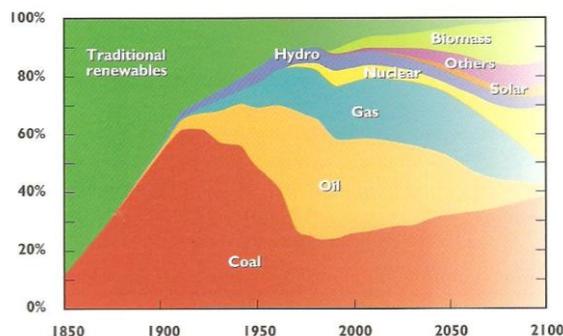


Рис. 1. Изменение доли отдельных источников энергии в энергобалансе [1]: traditional renewable – традиционные и возобновляемые источники энергии; biomass – биомасса; hydro – гидроэнергия; solar – солнечная энергия; nuclear – атомная энергия; gas – природный газ; oil – нефть; coal – уголь; other – другие.

В 2000 г. доля угля в балансе первичных энергоносителей составляла 5,4 % во Франции и 7,1 % в Италии, 16,7 % в Великобритании, 17,1 % в Испании и 25,1 % в Германии. Доля угля при производстве электроэнергии существенно выше, и в 2006 г. составила 93 % в Южной Африке, 80 % в Австралии, 78 % в Китае, 71 % в Израиле, 70 % в Казахстане, 69 % в Индии и Марокко, 59 % в Чехии, 58 % в Греции, 50 % в США и 47 % в Германии. Доля угля в энергобалансе Польши является одной из самых высоких в мире, соответственно 64,9 % и 93 %.

Максимальный рост использования угля при производстве электроэнергии прогнозируется в экономике Китая (увеличение производства энергии на угольных ТЭС с 30 в 2000 г. до 70...85 EJ к 2050 г., EJ – ЭкзаДжоуль, равен  $10^{18}$  Дж) [2], в Индии (увеличение потребления угля с 310 млн т в 2005-2006 гг. до 1,659 млрд т в 2031-2032 гг.) [3,4] и США (рост углепотребления на 20 % с 2006 г. по 2030 г.) [5].

Большинство государств - членов ЕС преимущественно имеют тенденцию к сокращению использования угля, как первичного источника энергии, и ограничению его доли при производстве электроэнергии [6]. Это делает ситуацию весьма серьезной, поскольку в 2000 г. доля угля составила 31 % при производстве электроэнергии в 25 странах-членах ЕС, при этом у 50 % установленных мощностей требуется модернизация, а спрос на электроэнергию к 2030 г. вырастет на 40 % [7].

Удовлетворение растущего спроса на электроэнергию с учетом охраны окружающей среды, обеспечивая условия для социального роста, становится всё более и более трудным. При анализе баланса энергоресурсов выявлено, что запасов нефти хватит на 41 год, природного газа - на 64 года, а угольных запасов хватит на гораздо больший срок – 251 год – табл. 1.

Одна из самых важных особенностей угольных запасов – практически повсеместная их доступность во всем мире – рис. 2, в то время как 68 % нефти и 67 % газовых

запасов в мире сконцентрированы на Ближнем Востоке и России.

Таблица 1. Запасы и ресурсы различных первичных источников энергии на 2004 г. [8]

Источники энергии	Запасы		Ресурсы	
	Гт у.т.	годы	годы	Кратность запасов
Органическое топливо	787	-	-	
Мазут	143	41	~ 200	125
Природный газ	138	64	~ 400	210
Уголь	506	251	~ 700	360
Ядерное топливо	55	82	~ 300	> 10000

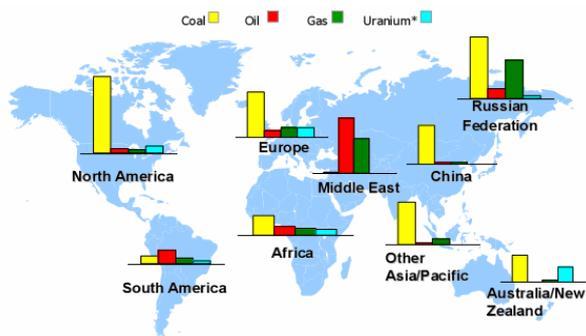


Рис. 2. Мировые энергоресурсы на 2005 г. [1]

## НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ЧИСТЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ

Необходимость сокращения выбросов CO<sub>2</sub> в атмосферу оказывает существенное влияние на развитие первичных источников энергии. В связи с этим при сжигании каменных и бурых углей в атмосферу выделяется наибольшее количество загрязняющих веществ. С другой стороны, самыми благоприятными для окружающей среды являются процессы получения энергии из возобновляемых источников (солнечная, гидроэнергия, энергия ветра, геотермальная энергия и т.д.), а также процессы выработки энергии на АЭС – рис. 3.

Развитие различных возобновляемых источников энергии и технологий с низким уровнем выбросов обусловлено расходами на производство электроэнергии. При анализе фактических и прогнозируемых расходов в странах ЕС и США выявлено, что самая дорогая электроэнергия вырабатывается на солнечных и ветряных установках, а самая дешевая – на угольных ТЭС и АЭС – табл. 2.

Таблица 2. Сравнение затрат на производство электроэнергии в ЕС и США [10, 11]

Энергоустановки	ЕС - 27 €/МВт·ч		США с \$/кВт·ч
	2005	2030	2004
Установки по сжиганию биомассы	25...85	25...75	5...15
ВЭС	35...175	28...170	5...13
СЭС	140...430	55...260	25...125
СТС	-	-	-

ГЭС большой мощности	25...95	25...90	3...20
ГЭС малой мощности (< 10 МВт)	45...90	40...80	2...8
Микро ГЭС	-	-	4...10
ГеоЭС	-	-	4,2
ПЭС	-	-	2...10
Пылеугольные ТЭС	30...40	45...60	8...20
Угольные ТЭС с котлами с кипящим слоем	35...45	50...65	3,2...3,9
ТЭС с газификацией угля	40...50	55...70	3,6...3,9
ГТУ	45...70	55...85	3,1...3,4
ПГУ	35...45	40...55	2
ЭУ с ДВС	70...80	80...95	6,9
АЭС	40...45	40...45	

Учитывая эту ситуацию, представляется весьма маловероятным, что уголь не будет использоваться в качестве источника выработки электрической и тепловой энергии, и как химическое сырье вследствие следующих причин:

- запасы угля - самые обширные среди ископаемых топлив и имеют повсеместную доступность;
- экономическая конкурентоспособность „калорийности угля”;
- меньшая чувствительность к экономическим и политическим изменениям (кризисные ситуации);
- продвижение технологий использования угля для производства энергии;
- значительная доля в существующем энергобалансе;
- традиция.

Необходимо применять много различных мероприятий для того, чтобы соответствовать требованиям по охране окружающей среды при длительном и обширном использовании угля, включая:

- более традиционное совместное сжигание угля с альтернативными видами топлива, включая биомассу;
- обеспечение очистки дымовых газов путем улавливания SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, твердых частиц и Hg;
- внедрение технологий улавливания и удаления CO<sub>2</sub>;
- внедрение новых технологий, высокоэффективного сжигания угля, сочетая процессы производства энергии с другими технологическими процессами, и использование ядерной энергии для газификации угля, получая синтетический газ и водород;
- производство "чистого" угля из доступных видов топлива.

Именно по этим причинам мы наблюдаем значительный рост эффективности и мощности модернизируемых и новых энергоблоков, на основе:

- более высоких термодинамических параметров пара;
- технологий сжигания топлива в кипящем слое;
- сжигания топлива в обогащенной кислородом среде и в кислороде (кислородное топливо);
- газификации угля совместно с использованием парогазовых установок.

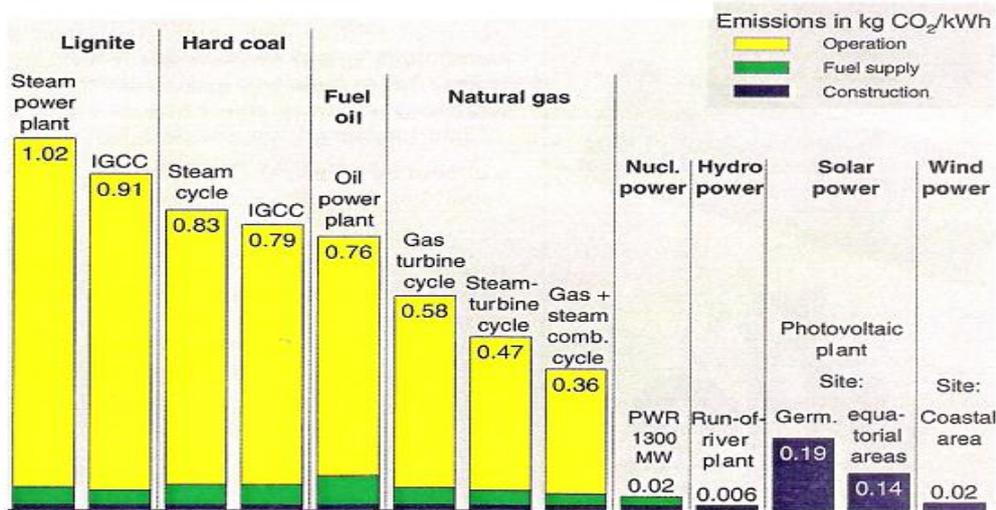


Рис. 3. Объем выбросов CO<sub>2</sub> в процессе производства электрической энергии в зависимости от вида топлива и технологии производства [9]: emissions in kg CO<sub>2</sub>/kWh – выбросы, кг CO<sub>2</sub>/кВт·ч; operation – эксплуатация; fuel supply – топливоподача; construction – строительство; lignite – бурый уголь; hard coal – каменный уголь; fuel oil – мазут; natural gas – природный газ; nucl. power – ядерная энергия; hydro power – гидроэнергия; solar power – солнечная энергия; wind power – ветровая энергия; steam power plant – ТЭС; IGCC – установки газификации угля совместно с ПГУ; steam cycle – паровой цикл; oil power plant – ТЭС на мазуте; gas turbine plant – газотурбинный цикл; steam turbine cycle – паротурбинный цикл; gas+steam comb. cycle – парогазовый цикл; PWR – ВВЭР; Run-of-river plant – ГЭС, работающая в естественном режиме реки; photovoltaic plant – солнечная электростанция; site – место; Germ. – Германия; equatorial areas – экваториальные районы; coastal areas – прибрежные зоны.

Выбор решения для выработки электроэнергии основан на сжигании каменного и бурого углей с учетом требований по охране окружающей среды в большей степени будет зависеть от затрат составляющих технологий и наличия инвестиционного финансирования - рис. 4. Минимальные инвестиционные и производственные затраты при сжигании угля имеют место при работе энергоблоков на сверх- и суперсверхкритических параметра (PC-Sub Plant, PC Super Plant). Для улавливания и удаления CO<sub>2</sub> наилучший экономический эффект обеспечивается при использовании парогазовых установок совместно с газификацией угля (NG Comb Cycle).

Ожидается существенное развитие строительства сверх- и суперсверхкритических энергоблоков и установок с газификацией угля.

До 2002 г. эксплуатировалось около 500 установок с газификацией угля (включая 22 установки совместно с использованием ПГУ), к 2015 г. планируется ввести в эксплуатацию около 70 новых энергоустановок этого типа. С 2004 по 2010 гг. в химической и топливной про-

мышленности наблюдалось повышение производительности газовых генераторов с 45 до 73 ГВт. Согласно прогнозам Китая на 2050 г. для процессов газификации в 85 % используется уголь.

### ВЛИЯНИЕ НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ СЖИГАНИЯ УГЛЯ НА КАЧЕСТВО И ОБЪЕМЫ ЗОЛОШЛАКОВ

В первой половине 21-го века имело место увеличение объемов и видов побочных продуктов сжигания угля не только из-за роста использования угля в целом, но и вследствие сжигания низкосортных углей, а также развития новых технологий сжигания угля и топливных смесей. В то же время технологии сжигания будут развиваться и совершенствоваться с точки зрения ограничения выбросов в атмосферу, образуя новые виды побочных продуктов сжигания угля.

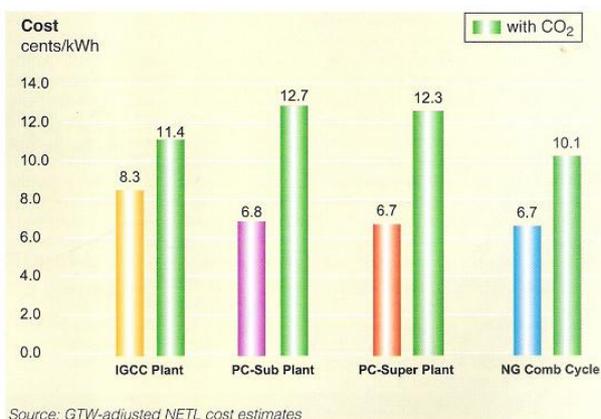
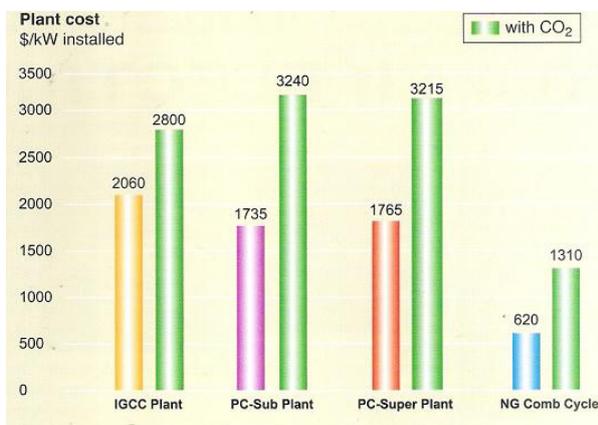


Рис. 4. Сравнение инвестиционных затрат на строительство энергоблоков, сжигающих каменный уголь и природный газ, а также затрат на производство электрической энергии (стоимость угля - 1,80 USD / млн БТЕ, стоимость природного газа - 6,75 USD / млн БТЕ в соответствии с обменным курсом USD на январь 2009 г.) [12]

В прогнозах, предусматривающих увеличение потребления каменного угля в период с 2006 г. по 2030 г., с использованием 60 % угля для производства электроэнергии со средней зольностью 15 %, приводится, что **выбросы летучей золы и шлака ТЭС будут увеличиваться примерно с 480 до 950...1080 млн т.** Наибольший рост потребления угля будет в Азии, где объемы летучей золы и шлака увеличатся пропорционально.

В большей части ППСУ, образующихся в топках котлов при пылевидном сжигании топлива, можно ожидать, что содержание полукокса (недожога) будет падать за счет внедрения новых более высокоэффективных систем и модернизации более старых установок. Хотя мы должны помнить, что часто изменение технологий сжигания угля вследствие экономических причин может привести к ограничению возможности полной утилизации летучей золы из-за непостоянства ее свойств. Также технология совместного сжигания угля и биомассы влияет на качество образовавшихся золошлаков.

После 2015 г. проблема пророса аммиака в летучую золу, применяемую для производства бетонов, может стать более серьезной из-за все более традиционного использования установок DeNox с целью ограничения выбросов NO<sub>x</sub>. Для удаления или нейтрализации аммиака будет необходимо обрабатывать золу. Во многих случаях эти процессы могут быть объединены с другими методами, такими как фракционирование, проведение денситметрических анализов или магнитная классификация, и т.д.

Более широкое распространение использования **кислородно-топливного горения** влияет не только на эксплуатационные параметры котлов, но также на свойства золошлаков. Высокая концентрация кислорода и высокие температуры горения приводят к полному выгоранию органических масс и полному окислению органических и неорганических составляющих. В образовавшейся летучей золе будет наблюдаться пониженное содержание полукокса и высокое содержание железа III типа. Мы можем также ожидать увеличение образования микросфер, что будет сопровождать процесс горения каменных углей.

Увеличение доли котлов с кипящим слоем приведет к повышению количества высококальциевых ППСУ [14]. В зависимости от серосодержания и от процентного соотношения совместно сжигаемого биотоплива свойства конкретной летучей золы и шлака значительно различаются. Большая часть золы котлов с кипящим слоем обладает хорошими вяжущими свойствами, составляя надежную основу для многих вяжущих, используемых в строительных и дорожных работах [15].

Решающее изменение количества и качества ППСУ имеет место вследствие внедрения процессов газификации топлива в массовом масштабе [16]. В большинстве таких установок используются газовые генераторы, предусматривающие удаление минеральных остатков газифицированного топлива в жидком состоянии, с жидким шлаком, представляющим собой побочный продукт газификации [13]. Лишь в небольшом количестве этих установок образуется гранулированный шлак и летучая зола, как в побочных продуктах, содержащих значительное количество полукокса.

Среди новых ППСУ особый интерес представляет жидкий шлак процессов газификации, который не только нейтрален по отношению к окружающей среде, но также применяется при производстве минеральной ваты, ак-

тивных заполнителей бетона, бесцементных вяжущих и т.д. Его высокая гидравлическая активность обусловлена накопленной внутренней энергией (охлажденная жидкость).

Известные технологии кондиционирования и использования ППСУ будут более широко применяться и поддерживаться новыми решениями в промышленном масштабе. Увеличение уровня использования ППСУ, среди прочего, будет обусловлено их ценностью как сырьевых материалов, их массовой и географической доступностью, а также необходимостью сохранения природных ресурсов, сопровождаемые увеличением затрат на складирование и сокращением наличия мест под новые отвалы. В последние годы было подтверждено, что повышение уровня использования может также быть обусловлено снижением выбросов CO<sub>2</sub>, и может привести к уменьшению затрат, что для многих технологий является главным ограничивающим фактором для их использования [17].

В зависимости от практических аспектов экономической и экологической политики данной страны, с такими большими объемами ППСУ можно обращаться, как с источником ценных материалов или как проблемными отходами. Очень часто прогнозы производства электроэнергии на угольных ТЭС ограничены лишь вопросами технологий сжигания, эффективности процессов, очистки дымовых газов, передачи энергии, и т.д., не учитывая вопросы оптимального менеджмента ППСУ. Необходимо подчеркнуть, что прогнозы, принятые Правительством Индии, в этом отношении - весьма исключительные [3], наблюдая рост объемов утилизации ППСУ со 125 млн т в 2000 г. и планируя использовать 225 млн т. в 2017 г. Утилизация ППСУ является одной из важнейших задач экономики Индии.

Для оптимального решения вопроса утилизации ППСУ необходимо, чтобы этой проблемой занимались, начиная со стадии проектирования новых и модернизированных ТЭС. Важно, чтобы учитывались возможности реализации и производства готовых продуктов, удовлетворяющих требованиям REACH, от смесей и определенных фракций летучей золы, шлаков, микросферы, магнетитовой пыли и т.д.

В тех странах, где сырьевой потенциал ППСУ не только признается должным образом, но и приносит существенный экономический эффект, а также в тех странах, в которых наблюдается недостаток угля как топлива, все больше и больше исторических запасов золошлаков забирается из отвалов, золошлаки классифицируются и сушатся, таким образом, становясь источником высококачественных материалов. В последующих годах может наблюдаться активизация международной торговли золошлаками.

В разных странах объемы утилизации золошлаков в значительной степени разнятся. Эти различия зависят от многих факторов. Эффективный обмен информацией и опытом между представителями разных стран и компаний в огромной степени осуществляется благодаря проведению конференций и семинаров.

## ВЫВОДЫ

1. В результате проведения анализа топливно-энергетических балансов показано, что потребление угля увеличится вдвое в период с 2006 г. до 2030 г., а это оз-

начает, что образование ППСУ будет увеличиваться с 480 млн т до около 1000 млн т.

2. Новые технология сжигания топлива и очистки дымовых газов внедряются в целях сокращения и отсутствия отрицательного воздействия на окружающую среду, что влияет на количество и качество золошлаков.

3. Для новых ППСУ и биомассы, образованных в пылеугольных котлах и котлах с кипящим слоем, а также в процессе газификации топлива, требуется проведение тщательных научных исследований для определения оптимальных условий их полезного применения.

4. Из-за больших различий объемов и направлений утилизации золошлаков в разных странах особое значения имеют международные конференции и т.д., что обеспечивает возможность эффективного обмена опытом и установления контактов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **WCI, BP:** Coal Facts 2000-2009.
2. **Transforming** coal for sustainability: a strategy for China. Energy for Sustainable Development. Volume VII no 4. December 2003.
3. **Sachdev R.K.:** Clean coal technologies – present scenario in India. Clean Coal Day in Japan 2007.
4. **Kumar V.:** Challenges, opportunities and ways of solving the problem on ashes from TPPs in India: a successful mission mode approach. Proceedings of the II International Scientific and Practical Workshop Ashes from TPPs. April 23-24, 2009. Moscow, Russia.
5. **Annual** Energy Outlook 2008 with Projections to 2030. EIA. Report #:DOE/EIA-0383(2008).
6. **Energy** in Europe. European Union Energy Outlook to 2020 ECC November 1999.
7. **Dolben G., Toth G.:** EU Energy Review – State of Plans and EURELECTRIC's views. VGB PowerTech 2007, nr.
8. **World** Energy Assessment – Overview 2004 Update UN Development Programme. World Energy Council.
9. **Jäger G., Theis K.A. :** Increase of power plant efficiency. VGB Power Tech. 2001, nr 11.
10. **An Energy** Policy for Europe. [SEC(2007)12]. Brussels, 10.1.2007.COM(2007)1 final.
11. **Wörgetter M.:** From fossil fuel to sustainable transport systems. Contribution to the Royal Society Biofuel Event «International Biofuels Opportunities». 23-24 April 2007 Royal Society, London.
12. **Updating** NETL comparative power plant cost estimates. GTW 2009, nr 1.
13. **Hycnar J.J., Szczygielski T.:** Prospects for power industry based on coal combustion. EuroCoalAsh 2008. October 6-8, 200. Warsaw.
14. **Hycnar J.J., Szczygielski T.:** Stan i perspektywy zagospodarowania popiołów lotnych i żużli rodzaju wapniowego. Karbo 2007, nr 1.
15. **Hycnar J.J.:** Czynniki wpływające na właściwości fizykochemiczne i użytkowe stałych produktów spalania paliw w paleniskach fluidalnych. Wyd. Górnicze. Katowice 2006.
16. **Hycnar J.J., Szczygielski T.:** Uboczne produkty spalania z procesów zgazowania węgla. Międzynarodowa Konferencja „Popioły z Energetyki”. 21-24 październik 2009, Zakopane.
17. **Szczygielski T., Hycnar J.J.:** HCFA and CO2 Savings in Europe – Resources, Markets, Technologies. WORLD OF COAL ASH . May 4-7, 2009 in Lexington, Kentucky USA.

**Т. Щигельски, Я. Хицнар.** Влияние новых технологий сжигания угля на типы и свойства золошлаков // Материалы III научно-практического семинара «Золошлаки ТЭС: удаление, транспорт, переработка, складирование», Москва, 22–23 апреля 2010 г. — М.: Издательский дом МЭИ, 2010. С. 33 – 37.