

УДК 502.174:658.567.1:628.474

© С.Я. Хруник, мол. наук. співробітник

Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів

ПРОГНОЗУВАННЯ ВПЛИВУ НА ДОВКІЛЛЯ ВИКОРИСТАННЯ ТВЕРДОГО АЛЬТЕРНАТИВНОГО ПАЛИВА В ЦЕМЕНТНІЙ ПРОМИСЛОВОСТІ

У відповідності із стандартами серії ISO 14040 здійснено оцінку потенційного впливу на довкілля згорання вугілля та спільного спалювання вугілля і альтернативного палива на основі твердих горючих відходів у процесі випалювання клінкеру в обертових печах за методикою IMPACT 2002+.

Ключові слова: згорання вугілля, випалювання клінкеру, використання альтернативного палива, викиди забруднюючих речовин, вплив на довкілля.

Вступ. Цементне виробництво характеризується інтенсивним використанням природних мінеральних і горючих корисних копалин. Зменшення споживання невідновного викопного палива у високоенергоємному процесі випалювання портландцементного клінкеру передбачено основними принципами Стратегії безперервного розвитку у цементній промисловості. Кам'яне вугілля на сьогодні є основним енергетичним ресурсом для цементної промисловості в Україні. У багатьох країнах світу для заміщення природного палива під час випалювання портландцементного клінкеру використовують горючі відходи. З огляду на те, що вугілля є «брудним» паливом, субституція його частки альтернативним паливом з горючих відходів контрольованого складу має на меті зменшення негативного впливу диверсифікації енергетичних ресурсів у цементному виробництві. Тому актуальним є дослідження горючих відходів, розроблення на їх основі альтернативного палива та прогнозування впливу на довкілля його використання в обертових випалювальних печах. Спільне спалювання відходів як альтернативного палива у цементній промисловості офіційно визнане Європейською комісією як краща ресурсоефективна практика в рамках флагманської ініціативи «За ресурсозберігаючу Європу» стратегії «Європа 2020»; оптимальний спосіб зменшення залежності від природного палива і сировини та зниження викидів CO₂ [1].

Аналіз останніх джерел і публікацій. У 2011 р. світове виробництво цементу сягнуло 3,4 млрд т (3,2 млрд т клінкеру), а потреба у цементі збільшилася порівняно з 2010 р. на 12% і становила 3,6 млрд т [2]. Виробництво цементу в Україні за підсумками 2012 р. склало 9,8 млн т і знизилося порівняно з 2011 р. на 6,8%.

На випалювання портландцементного клінкеру затрачається 3,0–3,3 ГДж/т клінкеру за сухим способом і 6,0–6,5 ГДж/т клінкеру за мокрим способом, що становить близько 30–40% собівартості цементу. Застосування високовуглецевого палива (вугілля) при випалюванні клінкеру спричиняє значні викиди діоксиду вуглецю. Близько 5% від загального обсягу викидів CO₂ у світі припадає на цементну промисловість [3]. Вугілля українських родовищ характеризується високою сірчистістю (1,5–3,9 мас.%) [4]. З використанням вугілля при випалюванні клінкеру пов'язують приблизно 5% світових викидів ртуті [5]. Кам'яне вугілля Донецького вугільного басейну містить підвищену концентрацію ртуті – від 0,08 до 8,5 мг/кг вугілля (в середньому 0,7 мг/кг) та інших елементів-домішок [6]. Негативний вплив на довкілля, пов'язаний з використанням у цементній промисловості вугілля, спонукає до пошуку шляхів його зниження.

Згідно зі статистичними даними [7], в Україні щорічно залишаються невикористаними близько 18 млн т горючих відходів, які перспективно переробляти в альтернативне паливо для цементної промисловості. Швидке збільшення використання альтернативного палива на основі горючих відходів у цементному виробництві може стимулювати впровадження в Україні кращих доступних технологій (BAT – Best Available Techniques) та природоохоронних заходів (BEP – Best Environmental Practices), зокрема: перехід на сухий спосіб випалювання клінкеру; зменшення використання теплової енергії; контроль якості відходів і модернізація систем подачі палива у піч; контроль викидів забруднюючих речовин тощо. Щорічно в країнах Євросоюзу згідно з даними Європейської цементної асоціації CEMBUREAU співспалюють 6,2 млн т альтернативного палива з відходів (заміщення 15% теплової енергії). У цементній промисловості Польщі, де ще 10 років тому заміщували лише 1,2% в енергетичному еквіваленті (% е. е.) вугілля альтернативним паливом, сьогодні заміщують близько 43% е. е.; щорічно співспалюють близько 900 тис. т палива з горючих відходів. При цьому, 9% палива з відходів становлять зношені автомобільні шини, а 78% – приготоване альтернативне паливо [8].

Горючі відходи як альтернативне паливо утилізують на деяких цементних заводах в Україні (ПАТ “Миколаївцемент”, ПАТ “Івано-Франківськцемент”, Криворізький завод ПАТ “Хайдельберг-Цемент Україна”). На сьогодні спільно з вугіллям спалюють в основному зношені автомобільні шини, якими заміщують декілька відсотків вугілля. Більшість цементних заводів в Україні планують заміщувати альтернативним паливом до 40% е. е. природного палива [9].

Застосування спільного спалювання вугілля і альтернативного палива на основі горючих відходів не повинно погіршувати якість одержуваного портландцементного клінкеру чи збільшувати негативний вплив на довкілля. Саме тому, альтернативне паливо для цементної промисловості розробляють і готують у відповідності з жорсткими технологічними та екологічними вимогами. Про доцільність використання горючих відходів як альтернативного палива можна стверджувати за результатами прогнозування і оцінки впливу на довкілля. Методи оцінки впливу на довкілля (EIA – Environmental Impact Assessment) як інтегрована частина оцінки впливу життєвого циклу (LCA – Life Cycle

Assessment) розроблені у відповідності з ISO серії 14040 і успішно застосовуються для порівняння та встановлення кращих способів поводження з відходами, зокрема і в цементній промисловості [10].

Мета і завдання дослідження. Основною метою досліджень була оцінка впливу на довкілля використання вугілля і спільного спалювання кам'яного вугілля і альтернативного палива на основі горючих відходів в обертових випалювальних печах.

Методи і матеріали. У дослідженнях використано методику для визначення кількості забруднюючих речовин, що утворюються при згоранні палива у процесі випалювання портландцементного клінкеру в обертових печах, розроблену Європейським об'єднанням відповідального спалювання і поводження з особливими відходами EURITS [11]. Оцінку і порівняння впливу на довкілля використання вугілля та співспалювання горючих відходів як альтернативного палива проведено згідно з методикою ІМРАСТ 2002+ (ver. 2.1) [12]. При розрахунках використано характеристики розробленого твердого альтернативного палива на основі відходів оброблення макулатури, зношених автомобільних шин, відходів тари пластикової дрібної використаної і тирси деревинної [13–15] та літературні дані щодо вугілля українських родовищ [4, 6, 16, 17] (табл. 1).

Таблиця 1 – Усереднені параметри кам'яного вугілля, зношених автомобільних шин і твердого альтернативного палива

Параметри		Кам'яне вугілля	Зношені автомобільні шини	Тверде альтернативне паливо
Вміст елементів-домішок:	S, мас.%	3,1	1,3	0,2
	Cl, мас.%	0,1	<0,1	0,3
	Cu, мг/кг	30,0	290,2	4,1
	Pb, мг/кг	13,0	24,2	7,7
	Cd, мг/кг	1,0	0,3	<0,1
	Cr, мг/кг	23,0	44,5	<0,1
	Ni, мг/кг	18,0	31,1	1,8
	As, мг/кг	135,0	3,2	0,9
	Hg, мг/кг	0,7	0,1	<<0,1
Zn, мг/кг	48,0	4100,0	11,7	
Калорійність, МДж/кг		26,0	26,0	21,9
Вологість, мас.%		6,9	5,0	13,2
Зольність, мас.%		16,5	17,0	9,9

Результати досліджень. Випалювання портландцементного клінкеру складається з двох паралельних процесів – згорання палива і випалу сировини. Усі наведені результати прогнозу впливу на довкілля згорання палива не враховують викиди від випалювання сировинних компонентів клінкеру.

Екологічна безпека та природокористування

Алгоритм оцінки впливу на довкілля полягає у перемноженні результатів інвентаризації процесу (кількості спожитих/емітованих речовин із різних елементарних потоків) з характерними факторами (рис. 1).

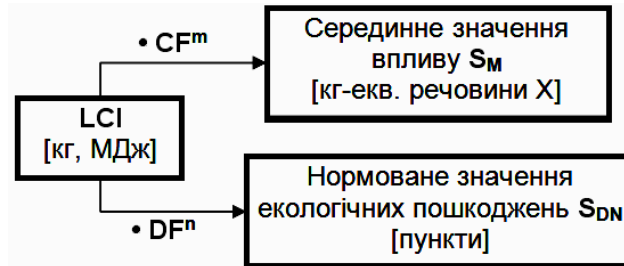


Рис. 1 – Алгоритм оцінки впливу на довкілля, де: LCI – елементарний потік;
 CF^m – серединний характерний фактор [кг-екв. речовини X/кг емісії];
 DF^n – нормований фактор пошкоджень (пункти/кг викидів)

У результаті інвентаризації процесу згорання палива (кам'яне вугілля, зношені автомобільні шини, тверде альтернативне паливо на основі суміші горючих відходів) в обертовій печі (етап I) виявлено забруднюючі речовини (рис. 2), які зв'язуються через серединні категорії (етап II) з категоріями пошкоджень (етап III).

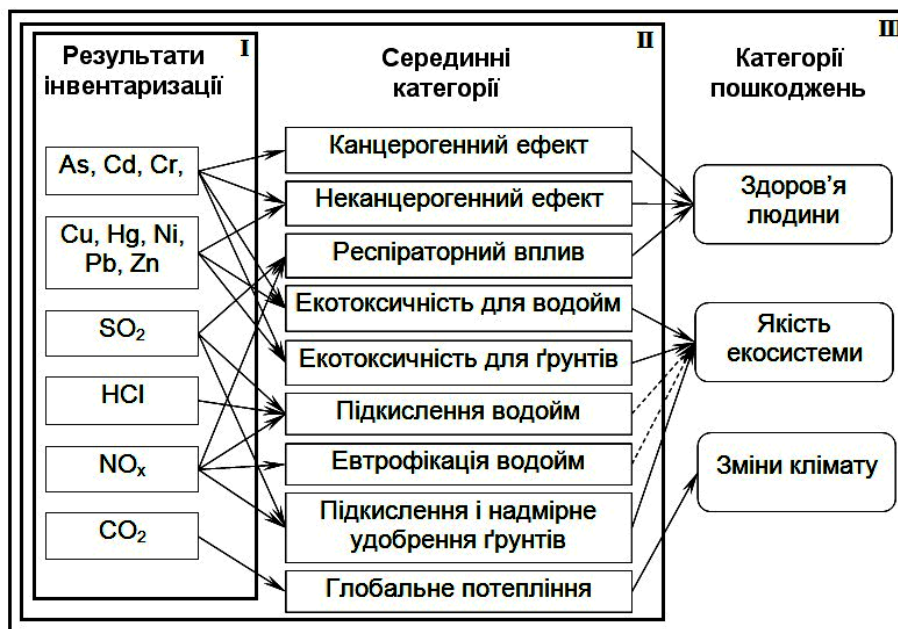
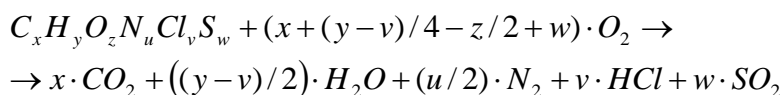


Рис. 2 – Загальна схема структури оцінки впливу на довкілля згорання палива в обертових випалювальних печах за методикою IMPACT 2002+

Як видно з рис. 2, забруднюючі речовини у більшості випадків здійснюють негативний вплив одразу на декілька процесів у довкіллі. Пунктирними стрілками представлені шляхи впливу між серединними категоріями і категоріями пошкоджень, які, як передбачається, існують, але кількісно не змодельовані, через обмеженість інформації [12].

На основі даних про вміст елементів-домішок та енергетичні характеристики кам'яного вугілля, зношених шин і твердого альтернативного палива із суміші відходів оброблення макулатури, відходів тари пластикової дрібної використаної і тирси деревинної (табл. 1) проведено інвентаризацію процесу згорання палива, необхідного для одержання однієї тонни клінкеру в обертовій випалювальній печі. Згідно з методикою EURITS розраховано кількості забруднюючих речовин, що утворюються від згорання палива за стехіометричним рівнянням реакції:



Кількість потенційних викидів забруднюючих речовин, що утворюються від згорання палива в обертовій випалювальній печі, обчислено з урахуванням їх трансфертних коефіцієнтів за формулою [10, 11]:

$$емісія_{i, нов.} = (надходження_i \cdot TK_{i, нов.}) / 100 \%,$$

де $емісія_{i, нов.}$ – емісія i -тої забруднюючої речовини у повітря, мг/кг;

$надходження_i$ – кількість i -тої забруднюючої речовини, що поступає у піч, мг/кг;

$TK_{i, нов.}$ – трансферний коефіцієнт – фракція i -тої забруднюючої речовини, що викидається у повітря, %.

На рівні серединних категорій оцінено вплив на окремі процеси у довкіллі спільного спалювання альтернативного палива порівняно зі спалюванням кам'яного вугілля для одержання однієї тонни клінкеру в обертових випалювальних печах за чотирма сценаріями (рис. 3).

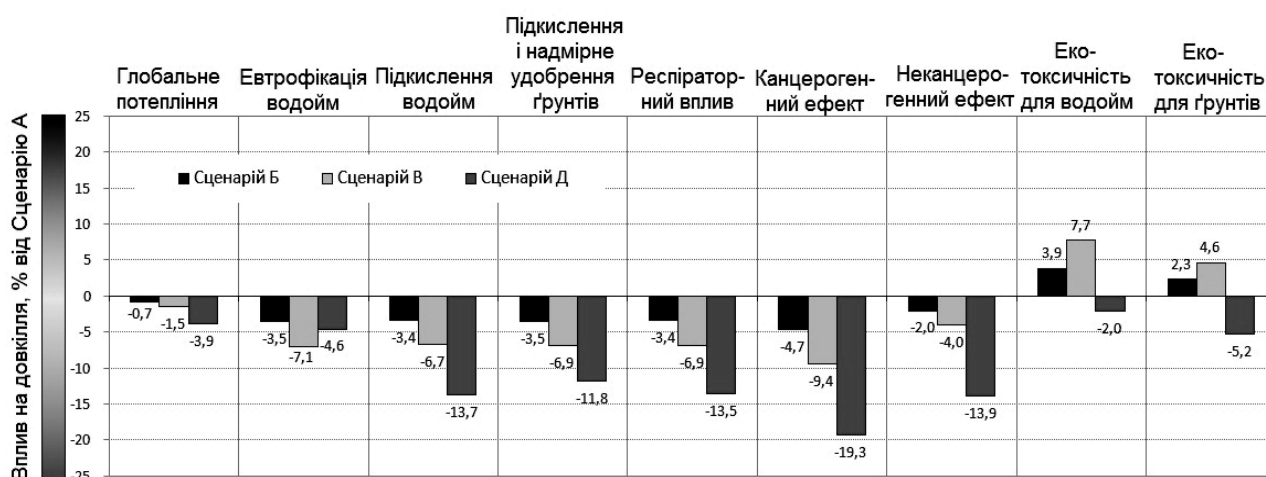


Рис. 3 – Порівняння впливу спалювання палива в обертових випалювальних печах за різними сценаріями на процеси у довкіллі

За базовий сценарій (Сценарій А) прийнято використання лише кам'яного вугілля. За Сценарієм Б 5% е. е., а за Сценарієм В – 10% е. е. вугілля замінено зношеними автомобільними шинами. Згідно зі Сценарієм Д – 10% е. е. вугілля замінено зношеними автомобільними шинами і ще 10% е. е. твердим альтернативним паливом із суміші відходів оброблення макулатури, відходів тари пластикової дрібної використаної і тирси деревинної.

Чим вищі значення показника, тим більший вплив на довкілля чинить процес; від'ємні значення (нижче нульового рівня) відображають кращий ефект з екологічної точки зору у порівнянні з базовим сценарієм. Як видно з рис. 3, заміщення кам'яного вугілля 5–10% е. е. зношеними автомобільними шинами (Сценарій Б і Сценарій В) збільшує на 3,9–7,7% вплив на екотоксичність для водойм і на 2,3–4,6% вплив на екотоксичність для ґрунтів порівняно з Сценарієм А. Водночас, знижується негативний вплив на глобальне потепління, евтрофікацію і підкислення водойм, підкислення і надмірне удобрення земель, респіраторний ефект і токсичність для людини.

Задля зменшення негативного впливу на усі розглянуті процеси у довкіллі запропоновано Сценарій Д. Використання 10% е. е. твердого альтернативного палива на основі суміші відходів оброблення макулатури, відходів тари пластикової дрібної використаної і тирси деревинної (Сценарій Д) знижує техногенний вплив на довкілля порівняно з базовим сценарієм та Сценаріями Б і В. Витрата палива на випалювання клінкеру мокрим способом порівняно із сухим практично удвічі вища, тому об'єми викидів відхідних газів на тонну одержаного портландцементного клінкеру відповідно більші. Вплив на процеси у довкіллі у відносних одиницях (%) для печей мокрого способу не відрізняється від печей сухого способу, а в абсолютних одиницях (кг-екв. речовини X/т клінкеру) цей вплив майже удвічі більший.

Результати обчислення показника пошкоджень кількісно представляють якісні зміни і є завершальним етапом в оцінці впливу досліджуваного процесу на довкілля (табл. 2). Нормовані значення пошкодження довкілля (S_{DN}), згідно з ІМРАСТ 2002+, подано у пунктах, які характеризують середньорічний вплив однієї особи на довкілля.

Таблиця 2 – Вплив згорання палива при випалюванні портландцементного клінкеру мокрим способом на пошкодження довкілля

Паливо	Здоров'я людини	Якість екосистеми	Зміни клімату
	пунктів/тис. т клінкеру		
Сценарій А	23,80	0,52	99,32
Сценарій Б	22,99	0,51	98,73
Сценарій В	22,19	0,51	98,14
Сценарій Д	20,64	0,47	95,98

Як видно з табл. 2, згорання палива при виробництві портландцементного клінкеру викликає найбільші пошкодження, пов'язані зі змінами клімату і здоров'ям людини. Заміщення частки кам'яного вугілля у процесі випалювання клінкеру альтернативним паливом за усіма запропонованими сценаріями (Сценарії Б, В, Д) спричинятиме менші

пошкодження здоров'я людини, якості екосистеми і змін клімату, порівняно з базовим сценарієм. Зі збільшенням частки альтернативного палива знижується рівень пошкоджень довкілля. Використання розробленого твердого альтернативного палива поряд зі зношеними шинами для випалювання однієї тисячі тонн клінкеру за Сценарієм Д викликатиме менші на 3,2 пункта пошкодження здоров'я людини, на 0,05 пункта – якості екосистеми і на 3,3 пункта – змін клімату, порівняно з базовим сценарієм.

Висновки. Встановлено, що згорання палива для випалювання клінкеру в обертових випалювальних печах спричиняє суттєвий вплив на глобальне потепління і, відповідно, на зміни клімату. У разі використання в обертових випалювальних печах 5–10% е. е. зношених автомобільних шин як альтернативного палива знижується негативний вплив на глобальне потепління, евтрофікацію і підкислення водойм, підкислення і надмірне удобрення земель, респіраторний ефект і токсичність для людини; незначно підвищується вплив на екотоксичність для водойм і ґрунтів порівняно з використанням виключно кам'яного вугілля. Заміщення частки вугілля розробленим твердим альтернативним паливом на основі суміші горючих відходів у рівних пропорціях зі зношеними автомобільними шинами знижує негативний вплив згорання палива під час випалювання портландцементного клінкеру на усі процеси у довкіллі порівняно з базовим сценарієм і дозволяє заміщувати двадцять та більше відсотків в енергетичному еквіваленті вугілля альтернативним паливом.

Таким чином, прогнозування впливу на довкілля за методикою ІМРАСТ 2002+ на рівні серединних категорій і категорій втрат дозволяє оцінювати виробничий процес на різних стадіях і в цілому, встановлювати взаємозв'язок між викидами забруднюючих речовин і негативними змінами довкілля, визначати найбільш вразливі до функціонування процесу елементи довкілля. Одержана інформація спонукає підприємців до пошуку найкращих доступних технологій та природоохоронних заходів (ВАТ/ВЕР) і практичного застосування у виробництві принципів мислення на рівні життєвого циклу (LCT – Life Cycle Thinking).

Список використаної літератури

1. Co-processing: the cement industry's contribution to the resource efficiency agenda [Electronic resource] / Eurobrief September 2012. – Mode of access: <http://www.cembureau.eu/newsroom/article/co-processing-cement-industry%E2%80%99s-contribution-resource-efficiency-agenda>. – Last access : 2013. – Title from the screen.
2. The cement industry in figures [Electronic resource] / Mode of access : <http://www.ficem.org/pres/THOMAS-ARMSTRONG-LA-INDUSTRIA-DEL-CEMENTO-EN-CIFRAS.pdf>. – Last access : 2013. – Title from the screen.
3. The Cement Industry and Global Climate Change: Current and Potential Future Cement Industry CO₂ Emissions / [M. Natesan at al.] // 6th International Conference : “Greenhouse Gas Control Technologies”. – Oxford : Pergamon, 2003. – P. 995–1000.
4. Саранчук В. Стан вуглехімії в Україні / В. Саранчук // Донецьк. вісн. НТШ. – т. 3. – Донецьк, 2003. – 136 с.

5. Global anthropogenic mercury emission inventory for 2000 / E.G. Pacyna, J.M. Pacyna, F. Steenhuisen, S. Wilson // *Atmospheric Environment*, 2006. – Volume 40, Issue 22. – P. 4048–4063.
6. Панов Б.С. Про проблеми екології у зв'язку з ртутноносністю вугілля Донбасу / Б.С. Панов, С.В. Сахно // *Эл. журнал "Проблемы экологии"*. – № 1–2. – Донецк : ДонНТУ, 2004. – С. 145–150.
7. Довкілля України : статистичний збірник 2011 р. / за ред. Н.С. Василенко. – К. : Державна служба статистики України, 2012. – С. 90–122.
8. Ślądcezek F. Wymagania najlepszych dostępnych technik (BAT) dla współspalania odpadów w przemyśle cementowym / F. Ślądcezek // *Prace Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych*. – Warszawa-Opole, 2012. – nr. 11. – S. 125–135.
9. Цемент [Електронний ресурс] – Режим доступу : http://www.lafarge.ua/wps/portal/ua/uk/1_1_1-Cement – Last access : 2013. – Title from the screen.
10. Comparison of the environmental impact of the incineration of calorific industrial waste in a rotary kiln and a cement kiln in view of fuel substitution : Report for EURITS [Electronic resource] / I. Vermeulen, J. Van Caneghem, C. Block, C. Vandecasteele // Belgium. – Mode of access : <http://www.incineration.info/files/publications/KUL%20study.pdf> – Last access : 2013. – Title from the screen.
11. Methodology for the determination of technical co-incineration criteria [Electronic resource] : http://www.incineration.info/files/publications/Eurits_tech_criteria_coincin.doc. – Last access : 2013. – Title from the screen.
12. Humbert S. IMPACT 2002+: User Guide. Draft for version 2.1 / S. Humbert, M. Margni, O. Jolliet // *Industrial Ecology & Life Cycle Systems Group, GECOS, Swiss Federal Institute of Technology Lausanne (EPFL)*. – Switzerland : Lausanne, 2005. – 40 p.
13. Саницький М.А. Інноваційний досвід використання альтернативних видів палива у цементній промисловості України / М.А. Саницький, Т.Є. Марків, С.Я. Хруник // *Принципи EUREKA та інших європейських програм як чинники інноваційного розвитку України : Наук.-практ. семінар*. – К. : ФО-П Т.А. Кінько, 2009. – С. 39–47.
14. Хруник С. Співспалювання горючих відходів у цементних печах / С. Хруник // *Геодезія, архітектура та будівництво : Матер. III міжнар. конф. молодих вчених ГАС-2010*. – Львів : Вид-во Львівської політехніки, 2010. – С. 94–95.
15. Саницький М.А. Екологічні аспекти співспалювання альтернативного палива в обортових цементних печах / М.А. Саницький, С.Я. Хруник, К. Чернер // *Будівельні матеріали та виробы*, 2011. – № 1 (66). – С. 2–6.
16. Юдович Я.Э. Токсичные элементы-примеси в ископаемых углях / Я.Э. Юдович, М.П. Кетрис. – Екатеринбург : УрО РАН, 2005. – 654 с.
17. Шубин Ю.П. Полезные элементы-примеси в углях Донбасса разных марок / Ю.П. Шубин // *Наукові праці УкрНДМІ НАН України*, 2008. – № 2. – С. 192–198.

Стаття надійшла до редакції 15.01.14 українською мовою

© С.Я. Хруник

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТВЕРДОГО АЛЬТЕРНАТИВНОГО ТОПЛИВА
В ЦЕМЕНТНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

В соответствии со стандартами серии ISO 14040 осуществлена оценка потенциального воздействия на окружающую среду сгорания угля и совместного сжигания угля и альтернативного топлива на основе твердых горючих отходов в процессе обжига клинкера во вращающихся печах по методике IMPACT 2002 +.

© S.J. Hrunyk

**PREDICTING THE IMPACT ON THE ENVIRONMENT USING SOLID ALTERNATIVE
FUELS IN THE CEMENT INDUSTRY**

In accordance with the standards ISO 14040 series a potential Environmental Impact Assessment of coal burning and coal with alternative fuels from solid combustible wastes co-firing during clinker sinterization in rotary kilns was evaluated by IMPACT 2002+ methodology.