

Eugeniusz MOKRZYCKI*, Alicja ULIASZ-BOCHEŃCZYK**

Wybrane problemy zużycia energii w przemyśle cementowym

STRESZCZENIE. Produkcja cementu jest procesem energochłonnym. Dotyczy to przede wszystkim produkcji klinkieru, gdzie zużycie energii stanowi ponad 80% całkowitej energii zużytej w procesie produkcji cementu. W przypadku metody mokrej produkcji cementu zapotrzebowanie na energię cieplną jest prawie dwa razy większe niż w metodzie suchej. Znaczne zużycie energii elektrycznej związane jest z mieleniem surowca i klinkieru z dodatkami. Średnie zużycie energii elektrycznej wynosi około 90—130 kW·h na tonę cementu. W świetle powyższego istotne znaczenie mają działania zmierzające do ograniczenia zużycia energii w przemyśle cementowym. Problemy te stanowią treść artykułu.

SŁOWA KLUCZOWE: przemysł cementowy, zużycie energii, sposoby ograniczania zużycia energii

Wprowadzenie

Produkcja cementu jest procesem o wysokim zużyciu energii, które szacowane jest na około 2% energii zużywanej na poziomie światowym (Szabó i in. 2003). Koszty energii w kosztach produkcji cementu wynoszą około 30—40%. Zużycie energii w procesach produkcji cementu dotyczy zużycia zarówno energii elektrycznej, jak i cieplnej.

* Prof. dr hab. inż., Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN

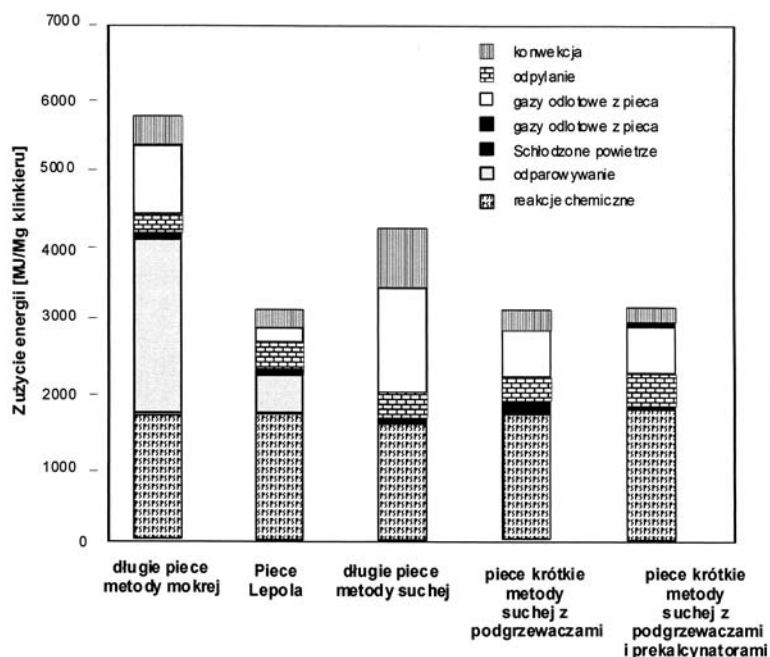
** Dr inż., Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi PAN, Pracownia Geotechnologii, Kraków.

Recenzent: prof. dr hab. inż. Roman NEY

W związku ze znacznymi kosztami produkcji cementu związanymi z wysoką energochłonnością procesów, przemysł cementowy dąży do ograniczenia zużycia energii, a zarazem zmniejszenia emisji CO₂ poprzez poprawę wydajności pieców cementowych oraz zastąpienia energochłonnej metody mokrej, metodami suchą i półsuchą. Jednak ograniczenie zużycia energii zależy przede wszystkim od rodzaju procesów technologicznych.

1. Zużycie energii w przemyśle cementowym

Procesy produkcji cementu są bardzo energochłonne. Teoretyczne zużycie energii w procesach produkcji cementu może być obliczane na podstawie entalpii powstawania 1 kg klinkieru, która wynosi około 1,76 MJ. Obliczenie to odnosi się do substratów i produktów reakcji w temperaturze 25°C i ciśnieniu 0,101 MPa (Worell i in. 2001), jednak w praktyce zużycie energii jest wyższe. Zużycie energii w piecu zasadniczo zależy od zawartości wilgoci w surowcu. Na rysunku 1 przedstawiono zapotrzebowanie ciepła dla różnych pieców.



Rys. 1. Zużycie energii dla różnych pieców stosowanych w przemyśle cementowym

Źródło: Worell i in. 2001

Fig. 1. Energy consumption for different kilns used in cement industry

Produkcja klinkieru jest najbardziej energochłonnym procesem w produkcji cementu. Zużycie energii w tym procesie stanowi ponad 90% całkowitej energii zużytej przy produkcji cementu (Martin i in. 1999).

Do wytwarzania energii cieplnej wykorzystywany jest z reguły węgiel kamienny. Zapotrzebowanie na energię cieplną dla pieca w metodzie mokrej wynosi 5,3 do 7,1 GJ/Mg klinkieru (Worell i in. 2000). Typowe zużycie ciepła dla pieca w metodzie suchej z 4/5 stopniowym podgrzewaczem cyklonowym zawiera się pomiędzy 3,2 a 3,5 GJ/Mg klinkieru; z 6 stopniowym jest zazwyczaj nieco niższe i wynosi 2,9—3,0 GJ/Mg klinkieru. Najbardziej sprawne piece z podgrzewaczami i prekalcyntorem zużywają około 2,9 GJ ciepła na tonę klinkieru (Worell i in. 2000).

W tabeli 1 przedstawiono rzeczywiste zużycie energii cieplnej dla różnych systemów piecowych.

TABELA 1. Rzeczywiste zużycie energii cieplnej dla różnych systemów piecowych

TABLE 1. Real heat energy consumption for different kiln systems

Metoda produkcji cementu	Rzeczywiste zużycie energii [GJ/Mg klinkieru]
Metoda sucha, piec z wielostopniowym podgrzewaczem cyklonowym i prekalcyntorem	3,0
Metoda sucha, piece obrotowe wyposażone w podgrzewacze cyklonowe	3,1—4,2
Metoda półsucha/metoda półmokra (piec Lepola)	3,3-4,5
Piece obrotowe długie metody suchej	do 5,0
Piece obrotowe długie metody suchej	5,0—6,0

Źródło: Dokument... 2004

Przyjmuje się, że właściwe zużycie energii dla metody suchej wynosi 3,4 GJ/Mg, a dla metody mokrej — około 5,29 GJ/Mg klinkieru (Khurana i in. 2002).

Najwięcej energii elektrycznej wykorzystywane jest w procesach mielenia surowca i cementu, gdzie zużywa się ponad 80% całkowitego zużycia energii elektrycznej. Zużycie energii elektrycznej wynosi średnio 90—130 kW·h/tonę cementu (Dokument... 2004).

Zapotrzebowanie na energię w procesach mielenia zależy od twardości mielonego materiału (wapień, klinkier, popioły lotne, żużel wielkopiecowy) oraz od wymaganego stopnia rozdrobnienia produktu końcowego. Przykładowo dla zmielenia żużla wielkopiecowego, który jest materiałem twardym, zużycie energii elektrycznej wynosi pomiędzy 50—70 kW·h/Mg dla osiągnięcia powierzchni 3500 cm²/g według Blaine'a (Worell i in. 2000).

Energia zużywana w procesie przemiału cementu wynosi pomiędzy 30 a 55 kW·h /Mg w zależności od rodzaju młyna oraz dodatków mineralnych (Szabó i in. 2003).

Obecnie budowane cementownie wyposażane są w systemy piecowe z 5-stopniowym podgrzewaczem cyklonowym i precalcynatorem, które zużywają 2,9—3,2 GJ energii na tonę klinkieru (Dokument...2004).

W tabeli 2 przedstawiono zużycie energii i paliw dla wszystkim podstawowych procesów produkcyjnych z uwzględnieniem najczęściej stosowanych urządzeń. Natomiast w tabeli 3 zamieszczono wielkość zużycia energii cieplej i energii elektrycznej dla różnych technologii produkcji cementu.

TABELA 2. Zużycie energii w poszczególnych ogniwach procesu produkcji cementu

TABLE 2. Power consumption for individual cement production process links

Proces technologiczny	Paliwo [GJ/Mg produktu]	Energia elektryczna [kW·h /Mg produktu]	Energia cieplna [GJ/Mg cementu]
KRUSZENIE			
Kruszarka szczękowa		0,3—1,4	0,02
Kruszarka stożkowa		0,3—0,7	0,02
Kruszarka walcowa		0,4—0,5	0,02
Kruszarka młotkowa		1,5—1,6	0,03
Kruszarka udarowa		0,4—1,0	0,02
MIELENIE SUROWCÓW			
Młyn kulowy		22,0	0,39
Młyn pionowy		16,0	0,28
System mieszany		18,0—20,0	0,32—0,35
Prasy rolowe		12,0	0,21
		18,0	0,32
WYPALANIE KLINKIERU			
Piece metody mokrej	5,9—7,0	25,0	6,2—7,3
Piece Lepola	3,6	30,0	3,9
Długie piece metody suchej	4,2	25,0	4,5
Piece krótkie metody suchej z podgrzewaczami	3,3—3,4	22,0	3,6—3,7
Piece krótkie metody suchej z podgrzewaczami i precalcynatorami	2,9—3,2	26,0	3,2—3,5
Piec szybowy	3,7—6,6		3,7—6,6
MIELENIE CEMENTU			
Młyn kulowy		55,0	0,6
Młyn kulowy/separator		47,0	0,51
Prasa rolowa/młyn kulowy/separator		41,0	0,45
Prasa rolowa/młyn kulowy/separator		39,0	0,43
Prasa rolowa/separator		28,0	0,31

Źródło: Worell i in. 2001

TABELA 3 . Zużycie energii dla różnych technologii produkcji cementu

TABLE 3. Power consumption for different cement production technologies

Metoda produkcji cementu	Energia cieplna [GJ/Mg]	Energia elektryczna [MW·h /Mg]
Metoda mokra — piece długie	5,0—7,5	0,025
Metoda półmokra — piece długie/Lepola	3,4—4,0	0,03
Metoda półsucha — piece długie/Lepola	3,3,9	0,03
Metoda sucha — piece długie	3,6—4,5	0,025
Metoda sucha — piece z podgrzewaczami	3,1—3,5	0,022
Metoda sucha — piece z prekalcyntorami	3,1—3,2	0,022
Piece szybowe	3,7—6,6	0,03

Źródło: Best... 1999; Szabó i in. 2003

2. Możliwości obniżenia zużycia energii w przemyśle cementowym

Podstawowym działaniem w celu obniżenia zużycia ciepła, a tym samym energii, na wypalanie klinkieru jest przechodzenie z produkcji cementu metodą mokrą na produkcję metodą suchą.

Jedną z metod zmniejszenia zużycia energii jest zmiana konfiguracji pieca do krótkiego pieca pracującego metodą suchą z wielostopniowym podgrzewaczem i prekalcyntorem (Dokument... 2004).

Obniżenie podstawowego zużycia energii można również osiągnąć przez wprowadzenie najnowszej generacji chłodziaków klinkieru oraz odzysk ciepła odpadowego w procesach suszenia i wstępnego podgrzewania.

Zużycie energii elektrycznej może być również ograniczone przez wprowadzenie systemów zarządzania energią oraz stosowanie urządzeń efektywnych energetycznie, takich jak wysokociśnieniowe prasy rolowe i napędy wentylatorów z regulacją prędkości (Dokument... 2004).

Zastąpienie młynów kulowych stosowanych do mielenia surowca wysokosprawnymi młynami rolowymi młynami kulowymi, współpracującymi z wysokociśnieniowymi prasami rolowymi lub poziomymi młynami rolowymi, pozwala na oszczędność około 7 kW·h/Mg surowca (Best... 1999; Worell i in. 2000).

Zużycie energii przez młyny kulowe stosowane do mielenia cementu wynosi około 33—45 kW·h/Mg cementu w zależności od stopnia rozdrobnienia cementu. Zastosowanie pras rolowych, młynów rolowych i pras rolowych stosowanych w mieleniu wstępnym

w połączeniu z młynami kulowymi pozwala zmniejszyć zużycie energii w procesie przemiału cementu do 22—33 kW·h/Mg cementu.

Również poprawa kontroli procesów spalania paliwa w piecu może przyczynić się do zaoszczędzenia w zależności od typu pieca około 2—10% paliwa (Venkateswaran, Lowitt 1988).

Szczegółowe analizy dotyczące zmniejszenia zużycia energii w przemyśle cementowym, w szczególności w przemyśle cementowym w Stanach Zjednoczonych, zostały przedstawione w pracach (Martin i in. 1999; Worell i in. 2000, 2001, Worell, Galitsky 2004).

W tabeli 4 przedstawiono możliwości zmniejszenia zużycia paliwa i energii elektrycznej w suchej metodzie produkcji cementu, która dominuje w krajowym przemyśle cementowym.

Bardzo ważnym aspektem w ograniczaniu zużycia energii jest aspekt ekonomiczny.

Metodą pozwalającą na ograniczenie zużycia energii z paliw naturalnych, a tym samym ograniczenie kosztów jednostkowego zużycia ciepła, jest zastąpienie paliwa konwencjonalnego paliwami alternatywnymi z odpadów. W przemyśle cementowym stosowane są również paliwa alternatywne takie jak: biogaz, odpadowy gaz koksowniczy, gaz z wielkiego pieca, tlenek węgla, gaz rafineryjny, kwasy żywiczne, zużyte oleje i ich mieszaniny ze zużytymi smarami, elektrody, szlamy przemysłowe, ług posiarczynowy, zużyte i zanieczyszczone rozpuszczalniki, zużyte smary, farby i żywice, odpady z produkcji farb, odpady i pozostałości olejowe, polistyren, guma, szlamy z kwasów smołowych, ziarna z oliwek, olej z orzechów kokosowych, bryły po wyciśnięciu oleju z oliwek, wytloki z trzciny cukrowej, kora, odpady drzewne, trociny i wióry, odpady z mielenia kawy, łuski ryżowe, łupiny orzecha, kolby kukurydzy, odpady z kurczaków, kompost z pieczarek, zużyte opony, folie, tworzywa sztuczne twarde, kartony po napojach, papier, tektura, zużyte drewno, tekstylia, odpady organiczne (kuchenne i ogrodowe), zużyte gumy, osady ściekowe, pojemniki z pestycydów, ziemia zanieczyszczona, odpady medyczne, emulsje wodne skondensowanych węglowodorów pochodzenia pierwotnego lub po przeróbce, smoły porafinacyjne, zużyte ziemie wybielające olejów transformatorowych, parafin i wazelin technicznych, smoły, łupki naftowe, muły węglowe, emulsje wodne zneutralizowanych smół rafinacyjnych, olejowe zawiesiny ziem wybielających oraz zużytych smarów, mączki zwierzęce, paliwa wytworzone z palnych frakcji odpadów przemysłowych i komunalnych (np. BRAM, RDF, INBRE) (Mokrzycki, Uliasz-Bocheńczyk 2004).

3. Zużycie energii w polskim przemyśle cementowym

Obecnie w krajowym przemyśle cementowym widać znaczącą tendencję w obniżaniu zużycia energii cieplnej na wypalanie klinkieru (tab. 5). Dane pokazują, że jednostkowe zużycie ciepła w produkcji cementu obniżyło się od roku 1990 — w którym wynosiło 5720 kJ/kg — o 40%, tj. do wartości 3405,5 kJ/kg w roku 2004. Spowodowane jest to przede wszystkim zamianą produkcji cementu metodą mokrą na metodę suchą (tab. 6). Wyprodukowanie 1 tony klinkieru w piecu cementowym w 2003 r. wymagało dostarczenia ponad

TABELA 4. Możliwości zmniejszenia zużycia paliw i energii elektrycznej w suchej metodzie produkcji cementu

TABLE 4. Fuel and electric power demand reduction prospects for cement production dry method

Wyszczególnienie	Oszczędność paliwa [GJ/Mg cementu]	Oszczędność energii elektrycznej [kW·h /Mg cementu]
PRZYGOTOWANIE SUROWCÓW		
Sprawny system transportu	—	3,2
Mielenie surowców	—	1,5—3,9
Sterowanie procesami młyna pionowego	—	0,8—1,0
Wysokowydajne młyny walcowe	—	10,2—11,9
Wysokowydajne sortowniki	—	4,3—5,8
Przygotowanie paliwa: młyny walcowe	—	0,7—1,1
WYPALANIE KLINKIERU		
Gospodarka energetyczna i układ sterowania	0,1—0,21	1,2—2,6
Wymiana uszczelnienia	0,02	—
Udoskonalenie systemu spalania	0,10—0,40	—
Opalanie pośrednie	0,14—0,20	—
Zmniejszenie strat ciepła poprzez płaszcz	0,09—0,33	—
Optymalizacja chłodników rusztowych	0,06—0,13	0—1,8*
Zastosowanie chłodników rusztowych	0,24	-2,4*
Odzysk ciepła do wytwarzania mocy	—	18,0
Wprowadzanie prekalcyntora	0,13—0,57	—
Zastąpienie długiego pieca metody suchej piecem krótkim z podgrzewaczami	0,38—0,80	—
Zastąpienie długiego pieca metody suchej piecem krótkim z prekalcyntorami	0,57—1,16	—
Sprawne napędy pieca	—	0,8—3,2
Zastosowanie paliw alternatywnych	>0,53	—
MIELENIE CEMENTU		
Gospodarka energetyczna i układ sterowania	—	1,6
Ulepszenie młynów w młynach kulowych	—	1,8
Wysokociśnieniowe prasy rolowe	—	7,0—25,0
Wysokowydajne sortowniki	—	1,7—6,0
ZAKŁAD W SZEROKIM POJĘCIU		
Konserwacja profilaktyczna	0,04	0—5,0
Wysokosprawne silniki	—	0—5,0
Napędy z regulowaną szybkością	—	5,5—7,0
Optymalizacja systemów sprężania powietrza	—	0—2,0
Energooszczędne oświetlenie	—	0—0,5
ZMIANA PRODUKTU		
Cementy z dodatkami	1,28	-15,0*
Cementy hutnicze	0,32	3,0
Ograniczenie rozdrobnienia cementów dla wybranych zastosowań	0,17—0,42	brak danych
	—	0—14,0

* Procesy, w których występuje zwiększone zużycie energii elektrycznej.

Źródło: Worell, Galitsky 2004

TABELA 5. Jednostkowe zużycie ciepła w przemyśle cementowym [kJ/kg klinkieru]

TABLE 5. Specific heat consumption in cement industry [kJ/kg of clinker]

Rok	Jednostkowe zużycie ciepła
1990	5 720
2000	4 100
2001	3 889
2002	3 770
2003	3 480
2004	3 405,5

Źródło: Informator... 2001, 2002, 2003, 2004, 2005

TABELA 6. Udział metod produkcji klinkieru [%]

TABLE 6. Share of clinker production method [%]

Rok	Metoda	
	sucha	mokra
1989	39	61
1999	56	44
2000	67	33
2001	83	17
2002	89	11
2003	98	2
2004	98	2

Źródło: Informator...2001, 2002, 2003, 2004, 2005

3,60 GJ ciepła, czyli spalania około 138 kg węgla kamiennego (o wartości opałowej około 26 GJ/Mg). Modernizacja procesu wytwarzania klinkieru, głównie w wyniku zmiany energochłonnej mokrej metody produkcji na energooszczędną suchą, pozwala na efektywniejsze wykorzystanie ciepła ze spalania paliw i obniżenie ilości ciepła na tonę klinkieru. W 1989 r. udział metody mokrej stanowił ponad 60%, w 2004 r. udział ten wynosił już 2%, co ma swoje odbicie w obniżeniu jednostkowego zużycia ciepła na wypał klinkieru (tab. 6).

Również o wiele mniej energochłonny jest obecnie proces mielenia cementu. Przemiał odbywa się młynach o dużej wydajności, pracujących w tak zwanym obiegu zamkniętym.

Obecnie w polskim przemyśle pracują dwie bardzo nowoczesne instalacje do mielenia cementu wyposażone w prasę rolkową. W 2004 roku średnie jednostkowe zużycie energii elektrycznej na mielenie cementu w branży wynosiło około 102,6 kW·h /Mg cementu. W latach 2002 i 2003 wynosiło ono około 105 kW·h /Mg cementu (Informator... 2004, 2005).

Wśród sposobów obniżenia kosztów zużycia jednostkowego ciepła na produkcję klinkieru w ostatnich latach w Polsce coraz większe znaczenie ma stosowanie paliw alternatywnych pozyskanych z odpadów, na co wskazują dane zamieszczone w tabeli 7.

TABELA 7. Uzysk ciepła z paliw alternatywnych w polskim przemyśle cementowym [%]

TABLE 7. Alternative fuel heat yield in Polish cement industry [%]

Rok	Uzysk ciepła
1997	1,34
1998	1,39
1999	1,15
2000	2,07
2001	1,97
2002	4,00
2003	6,50
2004	9,90

Źródło: Informator...2001, 2002, 2003, 2004, 2005

Podsumowanie

Proces produkcji cementu jest bardzo energochłonny i zależy od rodzaju zastosowanej technologii. Bardziej energochłonna jest mokra metoda produkcji cementu niż metoda sucha, czy półsucha. W procesie produkcji cementu najbardziej energochłonnym ogniwem jest produkcja klinkieru. Zapotrzebowanie na energię cieplną w metodzie mokrej szacowane jest na poziomie 5,3—7,1 GJ na tonę klinkieru, natomiast w metodzie suchej z 4 (lub 5) stopniowym podgrzewaczem — 3,2—3,5 GJ/tona klinkieru.

Energia elektryczna wykorzystywana jest w procesach mielenia surowca (wapień, żużel wielkopiecowy, klinkier) i cementu, gdzie jej średnie zużycie szacowane jest na poziomie 90—130 kW·h na tonę cementu.

Podstawowymi działaniami mającymi na celu obniżenie zużycia energii w przemyśle cementowym są:

- ✧ przejście z mokrej metody produkcji cementu na metodę suchą,
- ✧ zmiana konfiguracji pieca do krótkiego pieca z zastosowaniem wielostopniowego podgrzewacza i prekalcyntora,
- ✧ wprowadzenie nowej generacji chłodziaków klinkieru,
- ✧ odzysk ciepła odpadowego w procesach suszenia i wstępnego podgrzewania,
- ✧ wprowadzenie systemów zarządzania energią (DSM — *Demand Side Management*),
- ✧ zastosowanie efektywnych energetycznie urządzeń,
- ✧ zastosowanie nowych energooszczędnych układów mielenia surowca i cementu,
- ✧ zastosowanie paliw alternatywnych otrzymanych z opadów,
- ✧ kontrola procesów spalania.

Literatura

- Best available techniques for the cement industry. Cembureau. Bruksela 1999.
- Dokument Referencyjny dla najlepszych dostępnych technik w przemyśle cementowo-wapienniczym. Warszawa 2004.
- Informator SPCiW 2001, 2002, 2003, 2004, 2005. Kraków, Wyd. Stowarzyszenie Producentów Cementu i Wapna.
- KHURANA S., BANERJEE R., GAITONDE U., 2002 — Energy balance and conegeration for a cement plant. *Applied Thermal Engineering*, 22, p. 485—494.
- MARTIN N., WORELL E., PRICE L., 1999 — Energy efficiency and carbon dioxide emissions reduction opportunities in the U.S. cement industry. Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory. Report no LBNL — 44182.
- MOKRZYCKI E., ULIASZ-BOCHEŃCZYK A., 2004 — Paliwa alternatywne dla przemysłu cementowego. Wyd. IGSMiE PAN, Kraków.
- SZABÓ L., HIDALGO I., CISAR J.C., SORIA A., RUSS P., 2003 — Energy consumption and CO₂ emissions from the world cement industry. European Commission Joint Research Centre. Report EUR 20769 EN, June 2003.
- WORELL E., MARTIN N., PRICE L., 2000 — Potentials for energy improvement in the US cement industry. *Energy*, 25, p. 1189—1214.
- WORELL E., PRICE L., MARTIN N., HENDRIKS CH., OZAWA M.L., 2001 — Carbon dioxide emission from cement industry. *Annual Review of Energy and the Environment*, 26, p. 303—329.
- WORELL E., GALITSKY CH., 2004 — Energy efficiency improvement opportunities for cement making. Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory. Report no LBNL — 54036, January 2004.

Eugeniusz MOKRZYCKI, Alicja ULIASZ-BOCHEŃCZYK

Selected issues of power consumption in cement industry

Abstract

Cement production is a power-consuming process. The clinker production is especially concerned because it makes over 90% of total power consumed during cement production process. In case of cement production wet method heat power demand is almost twice as large as during cement production dry method. Significant electric power consumption is combined with raw material and clinker with supplements grinding.

Mean electric power consumption equals to about 90—130 kW·h per ton of cement. According to the latter issues heading to reduce power demand in cement industry reveal significant importance. These issues are presented in the paper.

KEY WORDS: cement industry, power consumption, power consumption reducing methods