

## АНАЛИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ УСТАНОВОК СУХОГО СПОСОБА ПРОИЗВОДСТВА ЦЕМЕНТНОГО КЛИНКЕРА

*Розглянуто сухий спосіб виробництва цементного клинкера. На основі розробленої математичної моделі виконаний розрахунок установки і проаналізовано вплив основних факторів на її паливну ефективність. Визначені задачі по вдосконаленню запічного теплообмінника.*

**Ключові слова:** цементний клінкер, сухий спосіб, запічний теплообмінник, енергетична ефективність.

*Рассмотрен сухой способ производства цементного клинкера. На основе разработанной математической модели выполнен расчет установки и проанализировано влияние основных факторов на ее топливную эффективность. Определены задачи по совершенствованию запечного теплообменника.*

**Ключевые слова:** цементный клинкер, сухой способ, запечный теплообменник, декарбонизатор, энергетическая эффективность.

*The dry method of production of cement clinker is considered. On the basis of the developed mathematical model the calculation of setting is executed and influence of main factors is analysed on its fuel efficiency. Tasks are definite on perfection of backstover heatexchanger.*

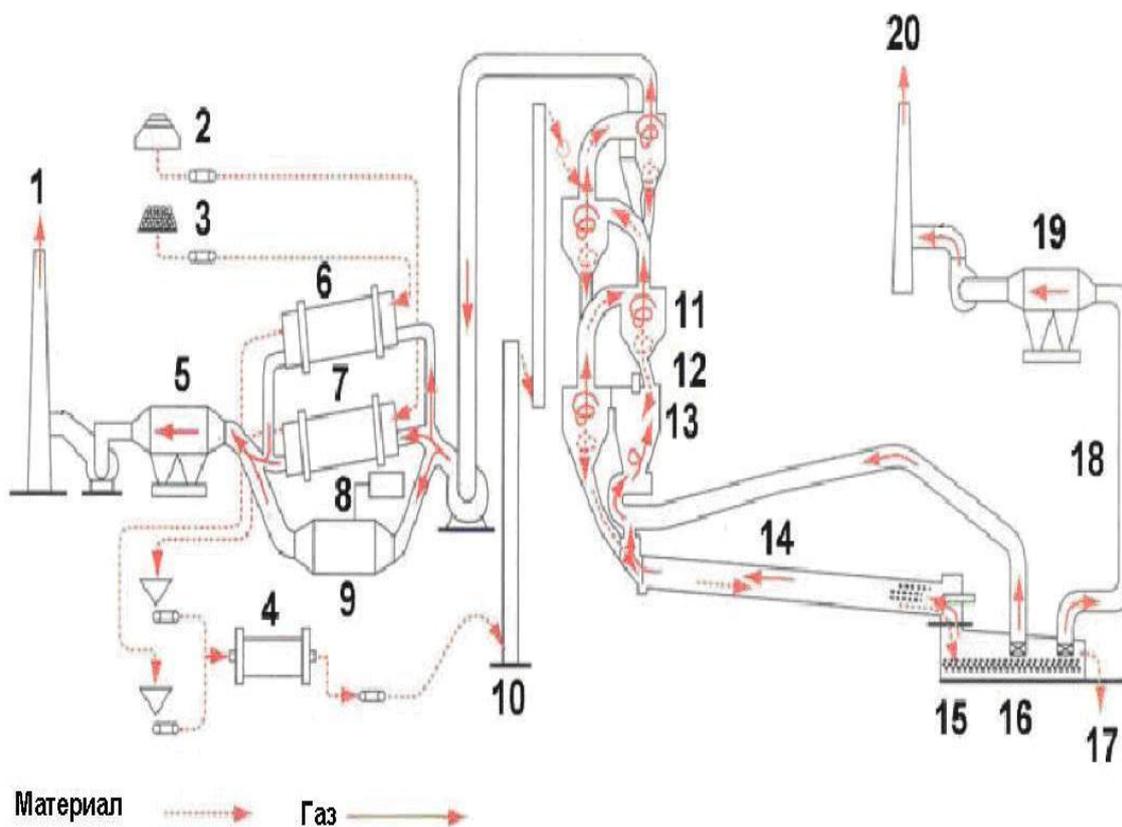
**Keywords:** cement clinker, dry method, backstover heatexchanger, power efficiency.

**Постановка задачі.** Производство цемента по сухому способу в сравнении с мокрым позволяет почти вдвое уменьшить затраты топлива на тонну готовой продукции. Поэтому вновь проектируемые заводы используют именно эту технологию. В Польше в 2003 году удельный вес выпуска цемента сухим способом составлял более 80 %. Двигается в этом направлении и Украина, хотя степень внедрения данной технологии (менее 20 % в 2003 году) представляется явно недостаточной.

**Основное содержание.** Цемент получают путем совместного помола в определенном соотношении клинкера, гипса и активных гидравлических добавок [1]. Сырьевыми компонентами для производства портландцементного клинкера служат глина и известняк, а также (при необходимости) железосодержащие добавки, например огарки. Известняк и глина раздельно дробятся и доставляются на соответствующие усреднительные склады. Процесс усреднения заключается в послойной укладке сырья в двускатные штабели с последующим забором материала с торца штабеля по всей его высоте. После усреднительных складов известняк и глина направляются в накопительные емкости [2].

Из накопительных емкостей сырье направляется в сушилки 6 и 7 (рис. 1), к которым подводятся отходящие печные газы. В них производится окончательная подсушка сырьевой

шихты, после чего на мельнице 4 осуществляется тонкий помол и получается сырьевая мука. Затем через дозировочный узел с весовыми дозаторами пневмоподъёмником 10 в строго заданном количестве подают сырьевую муку в запечный теплообменник 11. Далее в нагретой отходящими газами сырьевой муке последовательно проходят процессы диссоциации  $\text{CaCO}_3$  (декарбонизации) и физико-химические превращения шихты (при температуре до  $1450^\circ\text{C}$ ) в клинкерные минералы во вращающейся печи.



**Рис. 1. Типовая схема производства цемента сухим способом:**

1, 20 – дымовая труба; 2 – глина; 3 – известняк; 4 – мельница; 5 – электростатический фильтр; 6, 7 – сушилки; 9 – стабилизатор; 10 – пневмоподъемник; 11, 12, 13 – запечный теплообменник циклонного типа; 14 – вращающаяся печь; 15, 16 – охладитель; 17 – распылитель; 18 – сброс; 19 – пылеуловитель.

Малые ( $0,5 \dots 150 \text{ мкм}$ ) размеры частиц сырья вызывают необходимость использования прямоточно-противоточной схемы движения в запечном теплообменнике. Зачастую используют четырёхступенчатую циклонную схему предварительного подогрева сырья (рис. 1), характеризующуюся значительными габаритами и массой. Поэтому перспективна разработка новых более эффективных схем запечных теплообменников с использованием современных средств компьютерного моделирования термогидравлических процессов в многофазных потоках. Эта задача не может решаться в отрыве от анализа влияния параметров запечного теплообменника на эффективность работы установки в целом и соответствующего теплового расчёта, учитывающего схему движения потоков и основные процессы в элементах установки. Структурная схема установки для производства цементного клинкера представлена на рис. 2 [3].

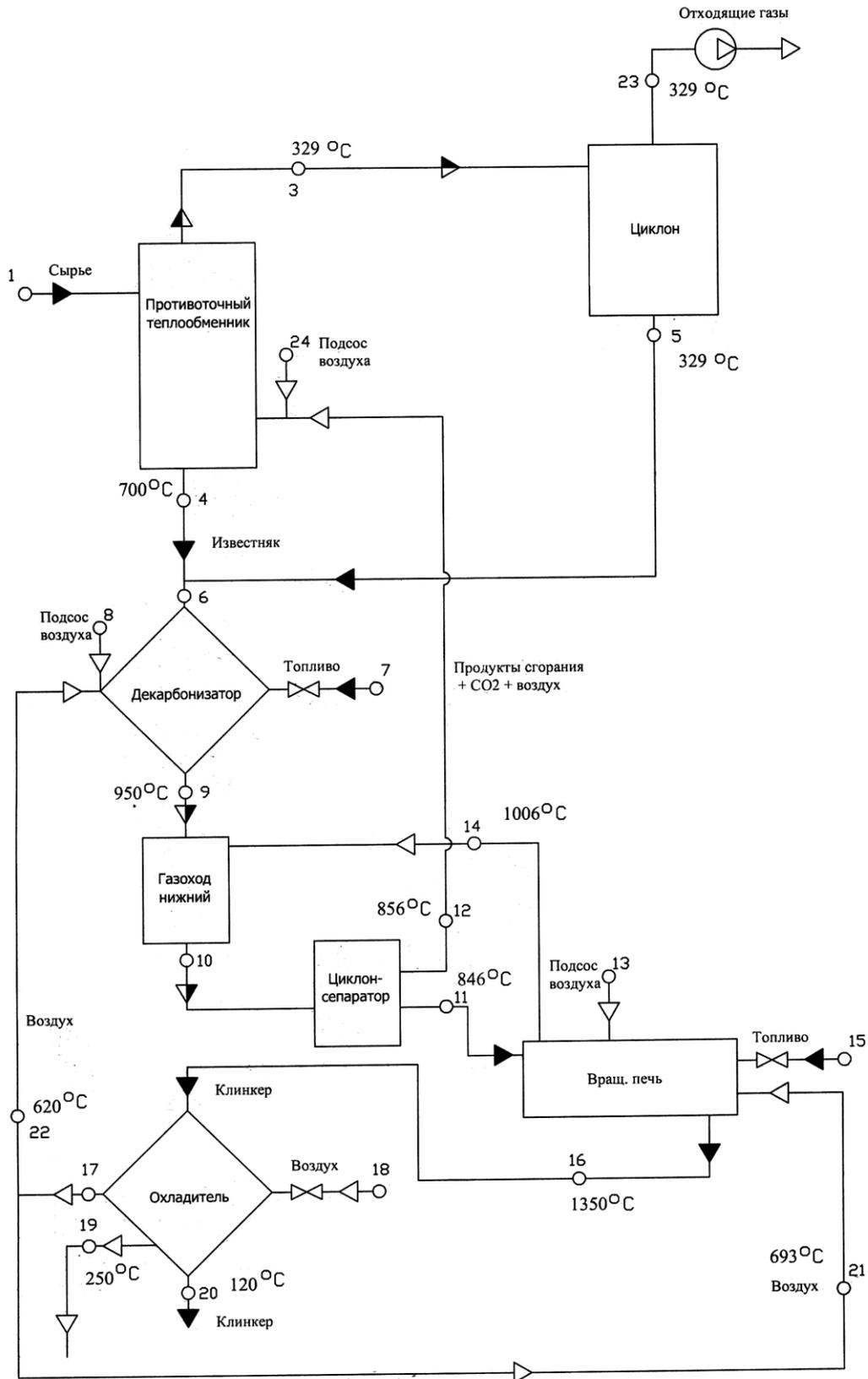


Рис. 2. Структурная схема установки для производства цементного клинкера

При создании математической модели рабочего процесса установка для производства цементного клинкера была разделена на функциональные элементы (запечный противоточный теплообменник, циклон, декарбонизатор, газоход нижний, циклон-сепаратор, вращающаяся печь,

охладитель), каждый из которых описывается уравнениями сохранения массы и энергии. Дополнительные условия связаны с особенностями функционирования оборудования и физико-химического процесса декарбонизации. В частности, время декарбонизации зависит от температуры процесса, размеров частиц и состава газа. Так как в данной модели не рассматривается время пребывания порции сырья в том или ином узле, был введен коэффициент завершенности процесса декарбонизации в декарбонизаторе – аналог времени пребывания сырья в декарбонизаторе. При этом процесс декарбонизации продолжается в нижнем газоходе и циклоне-сепараторе за счет теплоты продуктов сгорания, что учитывается уравнением сохранения энергии. Незавершенность теплообменных процессов учитывается с помощью величины недорекуперации теплоты, степень несовершенства процессов сепарации определяется коэффициентами уноса сырья с отводимыми продуктами сгорания. С помощью соответствующих коэффициентов задается величина подсоса холодного воздуха в запечном теплообменнике, вращающейся печи и декарбонизаторе, которая определяется как особенностям конструкции установки, так и ее техническим состоянием (трещины, зазоры и т. д.).

Для замыкания системы уравнений, описывающих рабочий процесс установки, использовались следующие параметры:

- температура сырья на входе в установку;
- температура окружающего воздуха;
- температура сырья на выходе из вращающейся печи;
- температура сырья на выходе из запечного теплообменника;
- температура клинкера на выходе из охладителя;
- температура продуктов сгорания и сырья на выходе из декарбонизатора;
- низшая теплота сгорания топлива (природного газа);
- теплота реакции декарбонизации;
- состав сырья, используемого для производства цементного клинкера.

В расчетах использовались теплофизические свойства продуктов сгорания, компонентов сырья и составляющих цементного клинкера, представленные в виде полиномиальных зависимостей от температуры.

Температура сырья на выходе из запечного теплообменника является параметром, определяющим эффективность работы как его самого, так и всей установки в целом. Величины температур, определяющих работу остальных функциональных элементов, приняты из литературных источников [3, 4]. На этой базе сформированы исходные параметры для базового режима, которые в табл. 1 выделены жирным шрифтом. Остальные параметры в характерных сечениях для базового режима определены расчётным путём.

Таблица 1

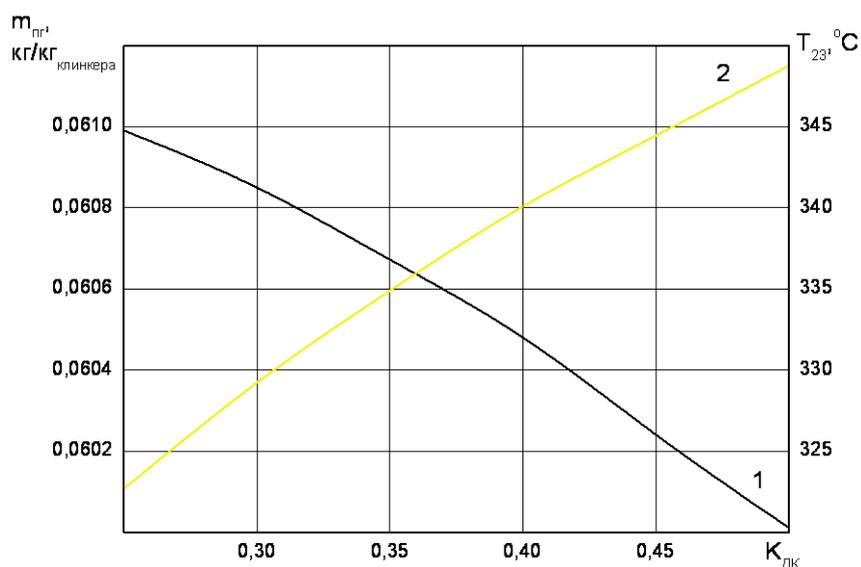
**Параметры в характерных сечениях установки на базовом режиме**

Степень декарбонизации в декарбонизаторе										0,35
Степень разложения оставшегося CaCO <sub>3</sub> в газоходе										0,35
Величина подсоса воздуха в печи и декарбонизаторе										0,05
Величина подсоса воздуха в теплообменнике										0,05
Разность температур газа и сырья на выходе из циклона, °С										10
Сечение	$T_m, °C$	$G_m,$ кг/с	$T_r, °C$	$G_r,$ кг/с	$G_{CO_2},$ кг/с	$G_{H_2O},$ кг/с	$G_{N_2},$ кг/с	$G_{возд},$ кг/с	$G_{т.г.},$ кг/с	
1	20,000	1,500								
3	329,614	0,000	326,614	1,791						
4	700,000	1,500								

5	329,614	0,000							
7									0,0271
8			20,000	0,024					
9	950,000	1,327	950,000	0,707	0,234	0,075	0,353	0,046	
11	846,330	1,214							
12			856,371	1,706	0,633	0,168	0,740	0,165	
13			20,000	0,042					
14			1006,75	0,885	0,286	0,094	0,387	0,119	
15									0,0340
16	1350,000	1,005							
18			20,000	3,870					
19			150,000	2,544					
20	120,000	1,005							
21			693,101	0,843					
22			620,000	0,483					
23			329,614	1,791					
24			20,000	0,000					

Интегрально энергетическую эффективность установки можно характеризовать удельными (на 1 кг цементного клинкера) затратами топлива или теплоты. Этот показатель очень важен, так как доля топлива в себестоимости цемента составляет 55-60 %. Уровень затрат теплоты в современных установках составляет 3...4 МДж/кг, а в качестве основного метода его снижения рассматривается повышение эффективности запечного теплообменника [5]. Однако вклад оказывают и другие процессы в установке.

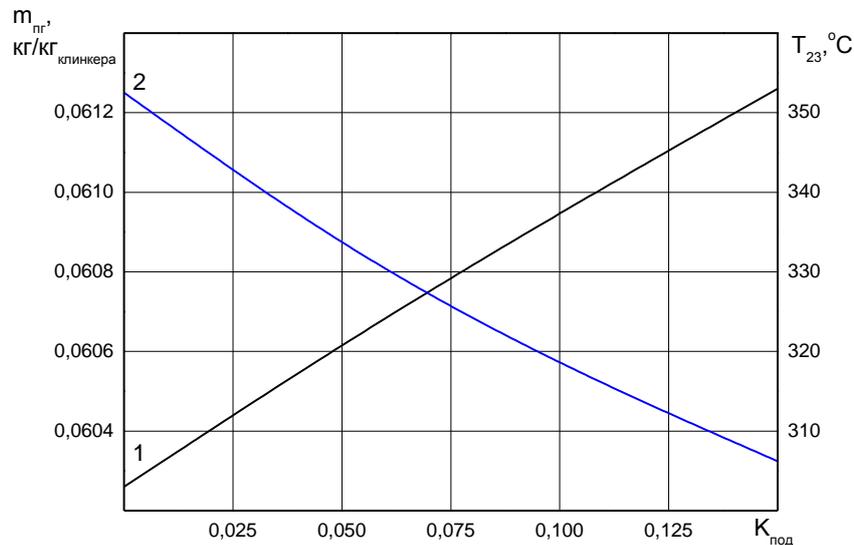
Интенсивность процесса декарбонизации зависит от температуры, размера частиц и парциального давления диоксида углерода в газовой среде. Процесс этот достаточно длительный, не завершается в декарбонизаторе и продолжается в нижнем газоходе и далее во вращающейся печи. Влияние степени завершенности этого процесса в декарбонизаторе на топливную эффективность установки иллюстрирует рис. 3.



**Рис. 3. Влияние степени завершенности процесса диссоциации известняка в декарбонизаторе:**

Величина подсоса воздуха 5 %, температура сырьевой муки на выходе из теплообменника 700 °C; температура сырья на выходе из декарбонизатора 950 °C. 1 – расход природного газа  $m_{пг}$ , ( $H_u=50$  МДж/кг); 2 – температура отходящих газов

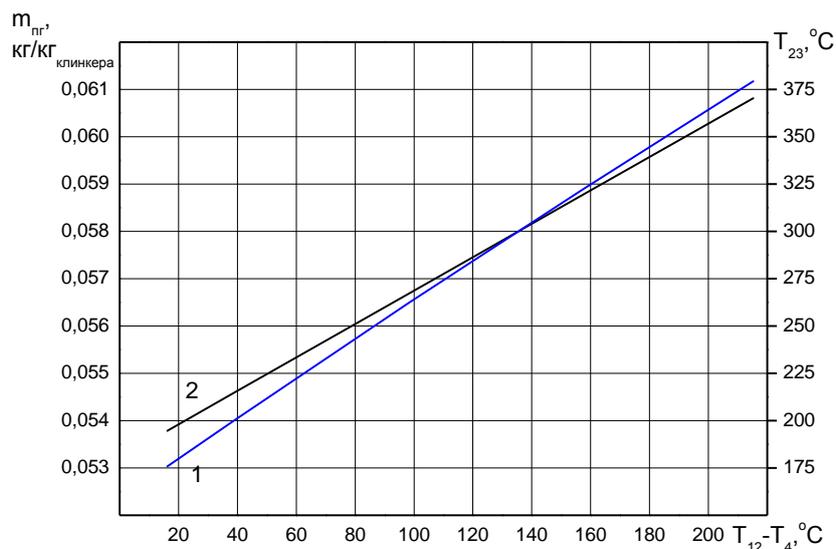
Величина подсосов холодного воздуха определяется как конструкцией установки, так и ее техническим состоянием. В любом случае с увеличением подсосов растёт удельный расход природного газа (рис. 4). Причём это сопровождается снижением температуры отходящих газов, так как холодный воздух «разбавляет» горячие газы.



**Рис. 4. Влияние подсосов воздуха:**

Степень диссоциации в декарбонизаторе 0,35; температура сырья на выходе из теплообменника 700°C; температура сырья на выходе из декарбонизатора 950 °C. 1 – расход природного газа  $m_{\text{пг}}$  ( $H_u = 50$  МДж/кг); 2 – температура продуктов сгорания на выходе из запечного теплообменника

И только при фиксированных параметрах «внутри» установки температура отходящих газов может использоваться для оценки её топливной эффективности (рис. 5). Но даже снижение температуры отходящих газов с 380 до 180 °C уменьшает удельный расход топлива всего на 10%. Таким образом, проектируя запечный теплообменник, можно в большей степени уделить внимание его габаритам и массе. В целом полученные результаты позволяют обоснованно задавать эффективность элементов установки, а представленный тепловой расчёт даёт основу для рационального выбора соотношения капитальных и эксплуатационных затрат.



**Рис. 5. Влияние запечного теплообменника на топливную эффективность:**

Степень диссоциации в декарбонизаторе 0,35; величина подсоса воздуха 0; температура сырья на выходе из декарбонизатора 950 °C. 1 – удельный расход топлива  $m_{\text{пг}}$ ; 2 – температура отходящих газов

### **Выводы**

1. Температура сырья на выходе из запечного теплообменника является параметром, определяющим эффективность работы, как его самого, так и установки в целом.
2. Уровень затрат теплоты в современных установках составляет 3-4 МДж/кг цементного клинкера, а в качестве основного метода его снижения рассматривается повышение эффективности запечного теплообменника.
3. Увеличение подсосов холодного воздуха повышает расход природного газа.
4. При фиксированных параметрах «внутри» установки температура отходящих газов может использоваться для оценки её топливной эффективности. Но даже снижение температуры отходящих газов с 380 до 180 °С уменьшает расход топлива всего на 10 %.
5. Полученные результаты позволяют обоснованно задавать эффективность элементов установки, а разработанный тепловой расчёт даёт основу для рационального выбора соотношения капитальных и эксплуатационных затрат.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Алексеев Б.В. Производство цемента: Учеб. для сред. ПТУ / Б.В. Алексеев. – М.: Высш. школа, 1985. – 264 с.
2. Процессы помола и классификации в производстве цемента: учеб. пособие / Белгород. гос. технол. ун-т им. В.Г. Шухова; под ред. В.С. Богданова. – М.: Изд-во АСВ; Белгород: Изд-во БГТУ, 2004. – 198 с.
3. Технология производства цемента сухим и полусухим способами / И.Ф. Пономарев, Е.Д. Верич, В.С. Чекрыгин и др. – К.: Будівельник, 1988. – 109 с.
4. Быховский М.А. Энергосберегающая технология производства цемента. Сухой способ производства: учеб. пособие / М.А. Быховский; Всесоюз. ин-т повышения квалификации руководящих работников и специалистов. – М.: Б. и., 1987. – 110 с.
5. Платонов В.С. Пути повышения эффективности производства цемента / В.С. Платонов, Е.А. Малооков; под ред. Е.Л. Кантора. – СПб.: Сев.-Зап. заоч. политехн. ин-т, 2000. – 74 с.

Рецензенты: д.т.н., професор Фісун М.Т.,  
к.т.н., доцент Трунов О.М.

© Верич В.В., Верич Е.Д., Петухов И.И.,  
Шахов Ю.В., 2009

*Стаття надійшла до редколегії 04.05.09*