

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЦЕМЕНТНОГО ПРОИЗВОДСТВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОНВЕРТИРОВАННОГО ТОПЛИВА

Ткачѳв В. В., Бандурин А. А., Коновалов В. М.

*ГОУ ВПО «Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова», Белгород, Россия (308012, г. Белгород, ул. Костюкова 46, БГТУ им. В. Г. Шухова), e-mail: val\_tv@mail.ru*

Рассмотрены варианты повышения эффективности работы печных установок за счет увеличения эксергетического уровня натурального топлива. Повышение работоспособности топлива становится возможным благодаря осуществлению реакции конверсии исходного органического топлива и воды в новое топливо, так называемый синтез-газ (смесь  $H_2$  и  $CO$ ). Расчетным путем показан количественный прирост эксергии синтез-газа по сравнению с исходным горючим. На примере печи обжига цементного производства выполнен сравнительный анализ получения в клинкерном холодильнике синтез-газа и его применения в качестве основного топлива. Реализация конверсии природного газа при утилизации тепла клинкера позволяет уменьшить расход натурального топлива, увеличить энергетический уровень топлива, температуру факела и повысить мощность печи, снизить выбросы отходящих газов, а также разработать новое высокоэффективное охладительное оборудование.

Ключевые слова: эксергия, конверсия топлива, синтез-газ (СГ), энергосбережение, экология.

## IMPROVING THE EFFICIENCY OF THE CEMENT PRODUCTION USING THE FUEL CONVERSION

Kononov V. M., Tkachev V. V.

*Belgorod State Technological University n.a. V.G. Shukhov, Belgorod, Russia (308012, Belgorod, Kostyukov str., 46., BSTU after V.G. Shukhov), e-mail: val\_tv@mail.ru*

Considered the ways for improving the efficiency of the furnace systems by increasing the exergy level of natural fuel. Increasing fuel efficiency is made possible by the implementation of the conversion reaction between the primary organic fuel and a water into the new fuel, so-called syngas (a mixture of  $H_2$  and  $CO$ ). Calculations are show the increase of syngas exergy in comparison with the primary fuel. On the example of the burning kiln of cement production, it was done the comparative analysis of the syngas production in the clinker cooler and its use as a primary fuel. The implementation of the natural gas conversion during the clinker heat recovery permit to reduce natural fuel consumption, to increase the energy level of the fuel, the flame temperature and to increase the capacity of the kiln, to reduce emissions of flue gases, and to develop new highly effective cooling equipment.

Key words: exergy, fuel conversion, syngas (SG), energy-saving, ecology.

Производство цемента требует значительного количества энергии – затраты на энергоносители составляют около 35–40 % от себестоимости конечного продукта, причѳм доля непосредственно топлива превышает половину этой величины. В Российской Федерации доля энергоносителей в себестоимости составляет 50–57 %.

Рост себестоимости производства и экологическое законодательство всего лишь два из главных факторов, обуславливающих соответствующим образом модифицировать процесс обжига клинкера. Пути совершенствования производства цемента преимущественно заключаются в изменении вещественного состава сырья и конечного продукта (использование техногенного сырья, выпуск смешанных цементов и др.) и повышении эффективности теплопередачи в обжиговых агрегатах. Большой популярностью в настоящее время пользуется строительство новых технологических линий сухого способа производства и использование альтернативных видов топлива и различных топливосодержащих отходов.

В большинстве вращающихся печей для производства клинкера сейчас используют традиционные виды топлива, такие как газ, мазут, различные виды угля и нефтекокс. Необходимая теплотворная способность может быть обеспечена путем смешивания какого-либо первичного (с высоким содержанием летучих углеводородов) и низкокалорийного альтернативного топлива.

Для сжигания в цементных печах используются практически все виды отходов производства и жизнедеятельности человека [1, 4]:

- отходы переработки сельскохозяйственной продукции (солома, пустые початки кукурузы, жмых, скорлупа орехов и т.д.);
- отходы переработки нефти и газа (твердые и пастообразные фракции, сопутствующий газ);
- бытовой мусор и осадок из очистных сооружений (либо как твердое топливо, либо в виде биогаза, выделяющегося при их разложении);
- автомобильные покрышки;
- опилки;
- отходы целлюлозно-бумажной промышленности и т.д.

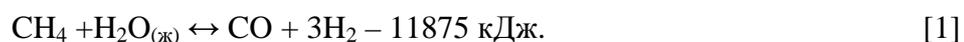
Значительный интерес представляет использование вторичных энергоресурсов и повышение эксергетического уровня первичного топлива. Перспективным направлением снижения энергопотребления является разработка технологии глубокого использования теплоты исходного топлива, в частности получение синтетического горючего (синтез-газа (СГ)) методом химической конверсии исходного топлива. СГ (смесь  $H_2$  и  $CO$ ) – универсальное горючее, которое получают из различных видов органического топлива и используют в качестве сырья для производства многих химических продуктов [2]. Сравнительный термодинамический анализ процессов сжигания первичного и конвертированного топлива показывает, что величина необратимых потерь в процессе сжигания топлива в последнем случае также меньше [3]. Более того, при сжигании синтез-газа уменьшается количество вредных выбросов в атмосферу.

Увеличение энергетической эффективности в промышленности всегда рассматривалось как одна из научно-технических задач инженеров и ученых, и сейчас эта проблема приобретает первоочередной приоритет. Встает необходимость рассмотрения не только количества энергии, когда ее потребление оптимизируется, но также и ее качества. Одинаковые в количественном отношении энергетические потоки обладают разной технико-экономической ценностью [7].

Эксергией называют возможность энергии любого типа производить работу в окружающей среде, т.е. эксергия является мерой качества используемой энергии.

СГ позволяет поднять эксергетический потенциал применяемого первичного топлива.

Рассмотрим стандартный процесс горения топлива и сжигание этого же топлива, предварительно конвертированного в СГ. Учитывая, что на 97 % всех цементных заводов РФ в качестве топлива используется природный газ, в настоящей работе исследования проводились для природного газа, представленного преимущественно метаном, для сравнительного анализа проведены расчеты и для твердого топлива – угля. Так горение 1 м<sup>3</sup> природного газа теплотворной способностью 36078 кДж/м<sup>3</sup>, с необходимым количеством воздуха 10,3 м<sup>3</sup> при температуре 25 °С в сумме даёт 14 кг отходящих газов с общим количеством теплоты 36454 кДж и температурой 1943 °С. Теперь рассмотрим процесс пароводяной конверсии природного газа (уравнение 1), прежнего состава, и сжигание продуктов конверсии.



Реакция 1 производится при температуре 900 °С. Количество СГ на выходе составляет 4 м<sup>3</sup> или 1,6 кг, с теплотой сгорания 11145 кДж/м<sup>3</sup> и физической теплотой 1210 кДж/м<sup>3</sup>. При сгорании образуется 14,8 кг отходящих газов с теплотой 50050 кДж и температурой 2355 °С.

Эксергия смеси раскаленных газов находится согласно следующей формуле:

$$E = H \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T}\right), \quad [2]$$

где  $H$  – энтальпия газового потока, кДж;  $T_0$  – температура окружающей среды, °С;  $T$  – температура газов, °С.

Следовательно, эксергия природного газа составит 31552 кДж, а конвертированного топлива – 44374 кДж. Таким образом, прирост эксергии составляет 12822 кДж или 41 %.

Расчет для твердого топлива показал, что эксергия угля составляет 34274 кДж, синтез-газа, произведенного из данного топлива 50401 кДж. Работоспособность конвертированного топлива увеличилась на 16127 кДж или 47 %.

При сравнении эксергии конвертированного топлива и природного газа, в одинаковых начальных условиях, при температуре окружающей среды (25 °С), получаем: эксергия синтез-газа, произведенного из 1 м<sup>3</sup> природного газа, составляет 39721 кДж, т.е. прирост работоспособности 8169 кДж или 26 %; эксергия синтез-газа, полученного из 1 кг угля, соответственно равна 45188 кДж, прирост эксергии – 10914 кДж (32 %).

Получение СГ протекает с высоким потреблением тепла, что обуславливает возможность использования данного эндотермического процесса в аппаратах для охлаждения клинкера. Так, в холодильном оборудовании будут осуществляться физико-химические процессы, начиная от элементарного нагрева теплоносителей и кончая эндотермическими реакциями. Одним из теплоносителей является углеводородное топливо,

а источником энергии для проведения физико-химических превращений – утилизируемое тепло клинкера. Рассматриваемая технология выполняет не только функцию охлаждения клинкера, но служит одновременно системой подготовки нового модифицированного топлива [3].

Возможность получения СГ в слое клинкера была исследована на экспериментальной установке. Осуществление реакции конверсии топлива контролировалось по отсутствию в отходящих газах опытной установки углеводородов и наличию СО. Было установлено, что при атмосферном давлении в высокотемпературной зоне клинкерного холодильника возможно получение СГ при температуре 800–850 °С без катализатора [6].

Рассмотрим расчёты материальных и тепловых балансов на примере обжига цементного клинкера по сухому способу производства. Использовались следующие исходные данные: топливо – природный газ; влажность сырьевой смеси – 5 %; температура окружающей среды – 25 °С; для конверсии топлива использовалась вода в жидком состоянии; температура конверсии – 900 °С.

Получение СГ осуществляется в высокотемпературной зоне холодильника, куда в слой клинкера подается смесь природного газа и воды. Количество реагентов, а также продуктов конверсии определяется из потребного расхода тепла на проведение реакции и исходного тепла клинкера из печи. Недостаток теплоты для обжига покрывается подачей второй части топлива непосредственно в печь. Таким образом, приход тепла в печную систему разбит на две части: получение и сжигание СГ и прямое сжигание природного газа. Так объёмная доля СГ от общего количества топлива на обжиг составляет 90 % или 0,221 м<sup>3</sup>/кг кл. и соответственно природного газа – 10 % (0,024 м<sup>3</sup>/кг кл).

Для сравнения расчетных данных обжига клинкера стандартным способом и с предварительной конверсией топлива задавались идентичные параметры производительности печи и температуры отходящих газов. Потери тепла от корпуса печи принимались – 6 % от суммы приходных статей теплового баланса. Результаты расчетов представлены в табл. 1, 2.

Расчеты показали, что при использовании в клинкерном холодильнике способа конверсии топлива исключаются потери тепла с аспирационным воздухом и увеличивается общий возврат тепла в печь, вследствие чего КПД холодильника возрастает на 10–15 %. Количество и состав отходящих газов меняется следующим образом (табл. 1): снижаются

Таблица 1

Материальный баланс печи и холодильника

Приходные статьи	Количество, кг/кг.кл.		Расходные статьи	Количество, кг/кг.кл.	
	Синтез-газ	Природный газ		Синтез-газ	Природный газ

1. Клинкер	1	1	1. Топливо	0,061	0,064
2. Отх. газы	1,773	1,795	2. Сырьевой материал	1,627	1,627
– из топлива	1,146	1,168			
CO <sub>2</sub>	0,157	0,166	3. Воздух в системе	1,040	2,311
H <sub>2</sub> O	0,173	0,136			
N <sub>2</sub>	0,798	0,846	4. Вода	0,045	–
O <sub>2</sub>	0,018	0,019			
– из сырья	0,627	0,627			
CO <sub>2</sub>	0,529	0,529			
H <sub>2</sub> O	0,098	0,098			
3. Избыточный воздух	–	1,208			
Итого	2,773	4,003	Итого	2,773	4,003

Таблица 2.

Тепловой баланс печи и холодильника

Приходные статьи	Количество, кДж/кгкл		Расходные статьи	Количество, кДж/кгкл	
	Синтез-газ	Природный газ		Синтез-газ	Природный газ
1. От сгорания топлива	2835	3006	1. На клинкерообразование	1813	1813
2. С топливом физич.	3	3	2. На испарение воды	203	203
			3. С клинкером	79	79
3. С воздухом в холодильник	26	59	4. С отходящими газами	440	438
4. С водой в холодильник	5	–	5. С избыточным воздухом	–	310
			6. На парообразование воды для конверсии	109	–
5. С сырьем	33	33	7. Потери через корпус печи	244	244
			8. Потери через корпус холодильника	14	14
Итого	2902	3101	Итого	2902	3101

выбросы CO<sub>2</sub> и N<sub>2</sub> на 5 % и увеличивается содержание в составе отходящих газов паров H<sub>2</sub>O на 27 %. Экономия натурального топлива составляет 5,7 % или 4,8 млн м<sup>3</sup> природного газа на 1 млн т клинкера.

Таким образом, с точки зрения энергетики, данная технология более полно, чем другие использует первичную энергию, запасенную в клинкере в виде химической энергии топлива.

Реализация конверсии природного газа при утилизации тепла клинкера позволяет:

- уменьшить расход натурального топлива на 5,7–13,8 % и более, при замене на действующей печи обычного подогрева вторичного воздуха, пропускаемого через слой клинкера, установками конверсии исходного топлива;
- организовать резкое охлаждение клинкера с улучшением его качества и эндотермическое преобразование топлива в СГ с увеличенной температурой сгорания и повышением мощности печи на 2–4 %;
- уменьшить выбросы CO<sub>2</sub> пропорционально снижению расхода топлива;
- разработать высокоэффективное охладительное оборудование, с меньшим потреблением электроэнергии и меньшими габаритными размерами при большем КПД, для замены традиционных конструкций холодильников для печей промышленности строительных материалов, металлургии, глинозема, соды, магнезита и доломита, шамота, извести и на многих других производствах.

Результаты выполненной работы можно рассматривать как перспективное направление в решении программы энергосбережения в энергоемких отраслях и экологических вопросах.

### Список литературы

1. Альтернативное топливо и его применение при производстве цемента: альтернативы использования альтернативного топлива нет?! URL: <http://www.giprocement.ru/about/articles.html/p=6> (дата обращения: 10.12.2012).
2. Корабельников А. В., Куранов А. Л., Рыжиков С. С. Химическая регенерация тепла и преобразования топлива в энергетических установках // Физико-химическая кинетика в газовой динамик. – 2006. – № 4. – С. 338–349. URL: [http://www.chemphys.edu.ru/media/files/2006-10-12-002\\_.pdf](http://www.chemphys.edu.ru/media/files/2006-10-12-002_.pdf) (дата обращения: 10.12.2012).
3. Коновалов В. М., Ткачев В. В. Химическая конверсия топлива в технологии портландцемента // Цемент и его применение. – 2012. – № 4. – С. 106–108.
4. Матвеев А. Ф., Черкасов А. В. Эффективность использования углеотходов в качестве сырьевого компонента // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова.– 2003. – № 5. – Ч. 2. – С. 175–177.
5. Носач В. Г. Энергия топлива. – Киев: Наукова думка, 1989. – 148 с.
6. Ткачев В. В., Коновалов В. М. Синтетическое топливо и методы химической регенерации тепла при производстве цемента. Научные исследования, наносистемы и ресурсосберегающие технологии в промышленности строительных материалов: сб. докл. Междунар. науч.-практ. конф., (Белгород, 5–8 окт. 2010 г.). – Белгород: Изд-во БГТУ, 2010. – Ч. 2. – С. 107–114.

7. Rivero R. An advanced Technological Strategy for Energy and the Environment / Rivero R., Del Rio R. // Strategic Planning for Energy and the Environment. – 2000. – Vol. 19. – № 3. – P. 9–24.

**Рецензенты:**

Везенцев Александр Иванович, доктор технических наук, профессор, «Белгородский государственный университет» (НИУ «БелГУ»), г. Белгород.

Кривобородов Юрий Романович, доктор технических наук, профессор, Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева (РХТУ им. Д.И. Менделеева), г. Москва.