

# ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

Коновалов В.М., канд. техн. наук,

Перескок С.А., канд. техн. наук,

Петрова М.А., инженер

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

Образумов А.Н., инженер

ООО ПФ «АЯН»

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛОМАССОБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В ПРОИЗВОДСТВЕ ЦЕМЕНТА\*

[konovalov52@mail.ru](mailto:konovalov52@mail.ru)

*Ресурсо-энеогосбережение – важное направление исследований для такой многотоннажной и энергоемкой отрасли как цементное производство. Использование техногенного сырья и комплексный подход к процессам теплообмена в отдельных зонах цементной печи позволил разработать эффективные конструкции теплообменных устройств, что значительно снижает энергозатраты на выпускаемую продукцию. Установлено, что предварительное термическое воздействие (ПТВ) части сырьевой смеси позволяет изменять морфологию кристаллов извести, создавать центры кристаллизации клинкерных минералов, что ускоряет процессы высокотемпературного синтеза. Предложен теплообменник, позволяющий моделировать процесс ПТВ и интенсифицировать теплообмен в печи. Цементы, полученные предложенным способом, обладают повышенной прочностью*

**Ключевые слова:** цемент, шлаки, эксергия, теплообменник предварительное термическое воздействие.

Решение вопросов энергосбережения, в том числе и путем внедрения новых технологий с низким уровнем энергозатрат, является важнейшим фактором перспективного развития цементного производства. Руководствуясь принципами комплексного подхода к решению задачи ресурсо-энергосбережения, все энергосберегающие технологические процессы условно можно разбить на две группы:

- энергосбережение за счет изменения вещественного состава сырья и вяжущего, снижения клинкерной составляющей в смешанных цементах;

- энергосбережение за счет повышения эффективности энергообмена как в тепловых, так и помольных агрегатах.

В первой группе следует выделить перспективность эксергетического подхода при выборе рационального компонентного и вещественного состава сырьевой смеси, что позволяет снизить затраты на клинкерообразование. Такой подход в полной мере реализуется при использовании техногенного сырья в качестве сырьевых компонентов, подбора и оптимального способа ввода минерализаторов [1, 2].

В настоящее время в различных регионах страны накоплены значительные запасы техногенных материалов, прошедших тепловую обработку, например шлаков, которые с успехом мо-

гут частично заменить природное сырье. В случае их использования удельный расход топлива может быть снижен в 1,5–2 раза, а выброс углекислого газа в атмосферу – на 20–25 %, что особенно актуально в связи с возникновением и постепенным усилением парникового эффекта, приводящего к глобальному потеплению и изменению климата Земли в целом.

Приведенные в табл. 1 данные эффективности использования различных шлаков, как компонента сырьевой смеси при мокром способе производства цемента, свидетельствуют, что допустимая дозировка шлака лимитируется содержанием кислых оксидов и ограничивается 30–45 % (в пересчете на клинкер). При этом удельный расход условного топлива на обжиг клинкера ( $q_{уд}$ ) при мокром способе может приблизиться к уровню сухого способа производства.

Использование металлургических шлаков в качестве дополнительного питания вращающейся печи имеет свою особенность. Из производственного опыта известно, что шлаки нельзя размалывать совместно с сырьевыми компонентами при мокром способе производства цемента, так как они частично гидратируют, схватываются и осаждаются в бассейнах, емкостях и трубопроводах. Поэтому наиболее рациональным способом их применения является подача без

измельчения непосредственно во вращающуюся печь.

В этом случае основная масса материала, предназначенного для дополнительного питания, в силу своего генезиса незначительно участвующая в твердофазовых процессах, требующих развитой удельной поверхности, взаи-

модействует с оксидом кальция сырьевой смеси преимущественно на стадии жидкофазного спекания. Таким образом, степень измельчения этого компонента не играет той решающей роли в процессе клинкерообразования, с которой связано завершение процесса обжига в основной сырьевой смеси.

Таблица 1

### Эффективность использования шлаков

Материал	Содержание оксидов, %					Предельная дозировка, %	Ограничение по оксиду	$q_{уд}$ , кУТ/т кл.
	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO			
Шлам	43	14	3,6	2,6	0,5	–	–	205
Шлак:								
- липецкий	47	36	8	0,4	7	45	SiO <sub>2</sub>	105
- челябинский	37	37	15	0,4	6	35	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	125
- ОЭМК	39	21	5	14	12	30	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	135

Это обстоятельство позволяет использовать для дополнительного питания печи немолотые шлаки с размером зерна до 5–10 мм. При этом достигаются следующие преимущества перед традиционным способом использования шлака, предусматривающим его совместный помол с сырьевым шламом:

- уменьшается на 25 % расход электроэнергии на помол;
- сокращается на 25 % расход мелющих тел;
- не подвергается абразивному износу оборудование транспорта и помолки шлама;
- не загустевает шлак при хранении в шламбассейнах.

Таким образом, при максимальном использовании шлаков ОЭМК в качестве компонента цементной сырьевой смеси может быть достигнуто до 30 % экономии топлива, снижено до 30 % выбросов углекислого газа, и на столько же – выбросов других парниковых газов в атмосферу. Это позволит не только повысить энергоэффективность производства цемента, но и улучшить экологическую обстановку.

Весьма перспективным направлением является использование техногенных материалов при получении компонентов, составляющих композиционные специальные цементы, так как с одной стороны, это позволяет экономить природные сырьевые ресурсы и удешевлять производственный процесс, а с другой стороны – способствует интенсификации процессов обжига за счет содержащихся в техногенных материалах примесей, выступающих в роли интенсификаторов. Использование в производстве смешанных цементов низкоосновного клинкера и термоактивированного природного сырья (аргиллитов, трепелов и др.) позволяет значительно сократить долю портландцементного клинкера [3–5] при высоких потребительских качествах готового продукта.

Вторым направлением энергосбережения является интенсификация теплообмена в печи между материалом и газовым потоком. Применение мероприятий, увеличивающих эксергию теплового потока от сжигаемого топлива, будут способствовать (при прочих равных условиях) уменьшению эксергетической потери при передаче теплоты от продуктов сгорания к нагреваемому телу. Необходимо стремиться к получению максимально возможной температуры в зоне горения топлива, что может быть достигнуто совершенствованием горелочных устройств и эффективными параметрами работы обжигового агрегата.

Кроме того, увеличению температуры в зоне горения будет способствовать увеличение энтальпии вторичного воздуха, которая определяется работой клинкерного холодильника. Сущность такой высокой эффективности экономии тепла при охлаждении клинкера заключается в том, что часть теплоты топлива заменяется теплотой горячего вторичного воздуха. При этом снижаются объем и скорость топочных газов, и значительно повышается теплообмен в печи. На практике это приводит к уменьшению температуры отходящих газов, улучшению условий образования обмазки в зоне спекания и снижению температуры корпуса печи и, следовательно, снижению теплотерь в окружающую среду.

Выполнение практических рекомендаций по рациональному распределению охлаждающего воздуха в подрешеточном пространстве колосникового холодильника типа «Волга» на ряде цементных заводов обеспечило повышение теплового к.п.д. колосникового холодильника с 0,7 до 0,93 и, как следствие, значительное снижение расхода топлива.

Многолетний опыт работы кафедры «Технологии цемента и композиционных материа-

лов» БГТУ им. В.Г. Шухова подтвердил на практике важность экономии тепла в горячей части печи.

Одним из важнейших условий эффективной работы вращающихся печей является интенсификация теплообмена в подготовительных зонах, где происходит сушка, подогрев материала и его декарбонизация. В печах сухого способа эффективность теплообмена определяется работой суспензионных теплообменников и декарбонизаторов. В печах мокрого способа интенсификация теплообмена в зоне сушки и подогрева определяется рациональной конструкцией цепных завес. Для уточнения интенсивности теплообмена при различном состоянии шлама [6] выполнены исследования на горячей модели цепной завесы. Полученные результаты свидетельствуют, что с увеличением пластичности материала в области конвективного теплообмена и ростом толщины пленки материала на цепях интенсивность теплообмена возрастает. При снижении влажности шлама, когда материал переходит в сыпучее состояние, величина регенеративного теплообмена определяется относительным временем пребывания теплообменного элемента в газовом потоке и материале. Следовательно, при проектировании цепных завес необходимо учитывать адгезионно-когезионные свойства сырьевых шламов, что позволит избежать ошибок расчетного характера.

Совместная разработка БГТУ им. Шухова и ООО ПФ «АЯН» цепной завесы с различными коэффициентами плотности по участкам и равномерно распределенной навеской цепей по объему печи, обеспечивающими низкое аэродинамическое сопротивление и высокую эффективность теплообмена, хорошо себя зарекомендовала на ОАО «Мордовцемент», ОАО «Себряковцемент» и ОАО «Топкинский цемент», уменьшив топливопотребление на 10–15 кг у.т./т клинкера.

Стремление повысить экономичность печей мокрого способа производства предполагает интенсификацию процессов тепломассообмена, что влечет дальнейшее расширение цепной завесы к горячему концу печи. Современный уровень развития техники позволяет расширить завесу до температуры газового потока 1200 °С. Для защиты футеровки от механического истирания цепями в высокотемпературных зонах хорошо зарекомендовали себя металлические пластины оригинальной конструкции производства ООО ПФ «АЯН», используемые при проектировании цепных завес. Это позволяет увеличить объем рабочего пространства в печи, улучшить регенеративный теплообмен между

материалом и футеровкой и значительно продлить срок эксплуатации бетона.

Основываясь на работах Гипроцемента и НИИЦементы по интенсификации тепломассообменных процессов в цементных печах, работах РХТУ им. Д.И. Менделеева по термохимической активации сырья при обжиге клинкера, принципиально новым подходом можно считать целенаправленную активизацию процессов синтеза клинкерных фаз посредством дискретного термического воздействия.

Основными принципами, заложенными в технологию предварительного термического воздействия (ПТВ) в высокотемпературных силикатных системах, являются:

- увеличение площади химического взаимодействия реагентов в твердом состоянии посредством развития рекристаллизационных процессов на границе раздела фаз, достигаемого изменением условий термического воздействия;
- увеличение количества кристаллических затравок, являющихся промотерами формирования основной клинкерной фазы – алита;
- создание условий массовой кристаллизации алитовой фазы, обеспечивающее целенаправленное формирование поликристаллической структуры портландцементного клинкера.

Такой клинкер обладает повышенной гидравлической активностью и формирует цементный камень высокой прочности. Для реализации на практике процесса термохимического модифицирования разработан вариант внутривспечного лопастного керамического теплообменника, выполняющего функцию встроенного декарбонизатора. Теплообменник может быть установлен на любой вращающейся печи с минимальными затратами, что помимо повышения активности клинкера, позволит повысить на 5–15 % производительность печи и, соответственно, снизить расход топлива.

Установлено, что прерывание процесса кристаллизации оксида кальция путем импульсного термического воздействия на низкотемпературных стадиях позволяет изменить его структуру и дисперсность. Под микроскопом (рис. 1) можно четко проследить влияние щелочных солей и

вторичного термовоздействия на характер кристаллизации СаО. В контрольном образце частицы извести представлены округлыми рыхлыми зернами размером 40–100 мкм, края которых имеют четкие, ровные границы.

При повторном обжиге имеют место процессы рекристаллизации, приводящие к совершенствованию и уплотнению структуры зерна. Присутствие добавки щелочных солей  $K_2SO_4$  и  $Na_2SO_4$  (3:1) в количестве 2 % по  $R_2O$  от массы

известии, как известно, ускоряющих и понижающих температуру разложения  $\text{CaCO}_3$ , усиливает рекристаллизацию оксида кальция за счёт появления солевых расплавов ( $t_{\text{пл.}} \text{K}_2\text{SO}_4 = 1069^\circ\text{C}$ , и эвтектики  $5\text{CaCO}_3 \cdot 4\text{NaK}_3(\text{SO}_4)_2$  с  $t_{\text{пл.}} = 820^\circ\text{C}$ ).

Вместе с тем, при повторном обжиге, термомодифицированный оксид кальция приобретает полидисперсный состав, возрастает доля мелких кристаллов размером 1-3 мкм, а так же образуются более крупные частицы размером

20–30 мкм. Структура поверхности частиц  $\text{CaO}$  уплотняется и, в результате взаимодействия его с  $\text{SiO}_2$ , повышается скорость диффузии и интенсивность реакции синтеза  $\text{C}_2\text{S}$ . При этом крупные, рекристаллизованные частицы  $\text{CaO}$ , способствуют образованию белита в области высоких температур, а образовавшийся  $\text{C}_2\text{S}$  не подвержен рекристаллизации, что увеличивает количество центров кристаллизации алитовой фазы.

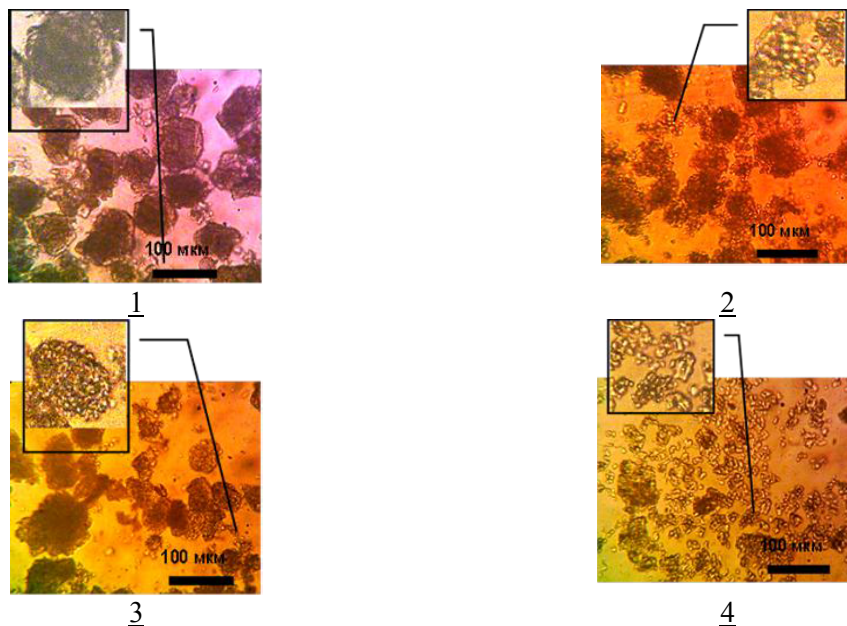


Рис. 1. Микрофотография иммерсионного препарата извести (обжиг при  $1200^\circ\text{C}$ ), 1,2 – нормального обжига; 3,4 – двукратного обжига (ПТВ); 1,3 – без добавок; 2,4 – с 2 %  $\text{R}_2\text{O}$

На рис. 2 приведены результаты испытания в малых образцах (1:0) цементов, полученных из сырьевых смесей, при обжиге которых часть сырьевой смеси предварительно обжигалась при температуре  $1000^\circ\text{C}$ . Максимальную прочность

показали образцы с 30 % предварительно обожженной шихты. Клинкер этой партии отличался полидисперсным составом фазы алита, что обеспечило высокий темп набора прочности как в ранние, так и поздние сроки.

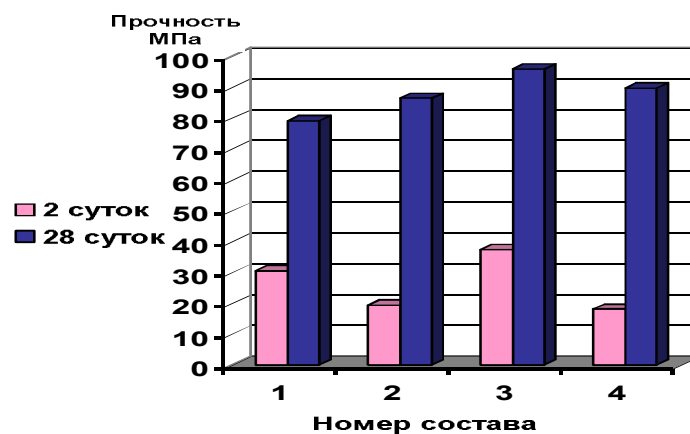


Рис.2. Прочностные показатели цементов на основе сырья с различным содержанием термообработанной сырьевой смеси: 1 – 0 %; 2 – 10 %; 3 – 30 %; 4 – 100 %

Для практической реализации разработан [7] керамический пересыпной теплообменник (рис. 3), который устанавливается в печи в зоне «декарбонизации» при температуре газового потока  $\approx 1400$  °С. Такое расположение теплообменника обеспечивает подачу части материала в газовый поток и дальнейшую его присадку к

более холодному материалу, что имитирует двукратный обжиг сырьевой смеси. Это обеспечивает улучшение теплообмена в печи и позволит примерно, на 10 % увеличить единичную мощность обжигового агрегата при незначительных капитальных затратах, что повысит конкурентоспособность мокрого способа производства.

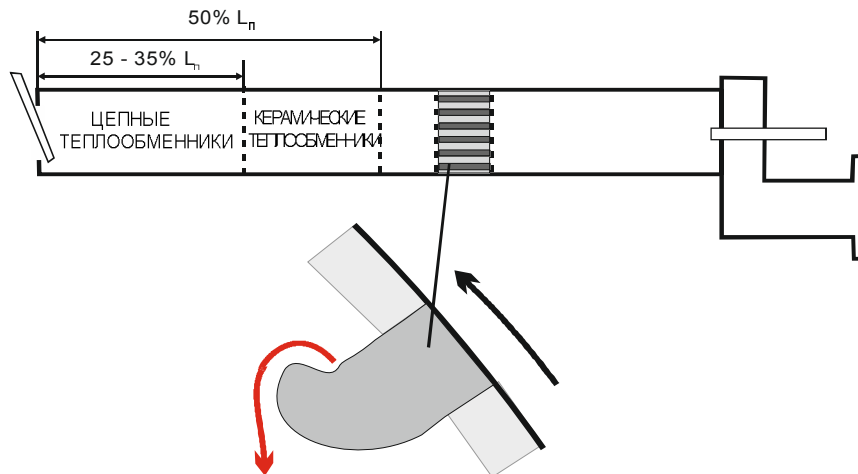


Рис. 3. Керамический теплообменник пересыпного типа и место его установки

**Выводы.** Исследования тепломассообменных процессов в цементной промышленности выявили основные направления энергосбережения позволяющие повысить эффективность производства. Использование техногенного сырья и разработка конструкторских решений по совершенствованию теплообменных и горелочных устройств позволили получить значительную экономию природного сырья и топлива. Применение принципа ПТВ для цементных сырьевых шихт обеспечило интенсификацию процессов минералообразования и позволило развить представления по термохимической активации сырья за счет изменения морфологии реагирующих веществ.

*\*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №НК-14-41-08031 р\_офи\_м.*

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лугинина И.Г., Коновалов В.М. Цементы из некондиционного сырья. Новочеркасск: Уч.-изд., 1994. 232 с.
2. Коновалов В.М., Чекулаев В.Г., Гликин Д.М. Влияние условий введения минерализатора на термомодифицированные портландцементные смеси / Научные чтения и инновации (XXI научные чтения), Сб. докл., часть 1, Белгород: Изд-во БГТУ. 2014. С.130–135.

3. Борисов И.Н., Мандрикова О.С., Семин А.Н., Расширяющаяся добавка на основе сульфатированного и ферритного отходов для получения специальных цементов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2012. №1. С. 125-128.

4. Классен, В.К. Эффективность использования шлако-меловой смеси в качестве сырьевого компонента для производства цементного клинкера / В.К. Классен, И.А. Шилова, Е.В. Текучёва // Фундаментальные исследования. 2006. №12. С. 77-80.

5. Коновалов В.М, Гликин Д.М., Соломатова С.С. Использование аргилитов в производстве смешанных цементов // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 2; URL: <http://www.science-education.ru/129-22244>

6. Борисов И.Н. Управление процессами агломерации Материалов и формирования обмазки во вращающихся печах цементной промышленности. Белгород: Изд. «Белаудит», 2003. 112 с.

7. Пат. 91141 Российская Федерация, МПК F23D 14/20 (2006/1). Вращающаяся обжиговая печь для производства цементного клинкера / В.М. Коновалов, В.Н. Шевченко, А.Н.Образумов А.Н., А.А. Гончаров, А.В. Литовченко, М.А. Акуликина; заявитель и патентообладатель ООО ПФ «АЯН», БГТУ им В.Г. Шухова. - №2009134733, заявл. 17.09.2009. опубл. 27.01.2010, Бюл. №3 –

---

**Konovalov V.M., Pereskok S.A., Petrova M.A., Obrazumov A.N.**  
**INCREASE OF EFFICIENCY OF HEATMASS-EXCHANGED PROCESSES IN CEMENT PRODUCTION**

*Resource-energy-saving is an important research direction for such large-scale and power-hungry industry as cement production. Use of the technogenic raw materials and complex approach to the heat exchange processes in separate zones of cement kiln allowed to work out the effective constructions of heat-exchange devices, that considerably reduces energy consumptions connected with the produced products. It is found that preliminary thermal influence (PTI) of raw materials mixture part allows to change morphology of lime crystals also to create the centers of clinker minerals crystallization that accelerates the processes of high temperature synthesis. A heat-exchanger that allows to design the process of PTI and to intensify a heat exchange in a stove is offered. The cements got by an offered method possessed enhanceable durability.*

**Keywords:** cement, slag, exergy, heat-exchanger, preliminary thermal influence

---

**Коновалов Владимир Михайлович**, кандидат технических наук, доцент.  
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.  
Адрес: Россия, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46.  
E-mail: konovalov52@mail.ru

**Перескок Сергей Алексеевич**, кандидат технических наук, доцент.  
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.  
Адрес: Россия, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46.  
E-mail: spereskok@mail.ru

**Петрова Марина Александровна**, инженер.  
ООО «Магма»  
Адрес: Россия, 430030, г. Саранск, ул. Васенко, 38Б.  
E-mail: akumarina@yandex.ru

**Образумов, Александр Николаевич**, инженер.  
ООО ПФ «АЯН»  
Адрес: 301295, Тульская обл, Киреевский р-н, п. Шахты - 8, ул. Дорожная, д. 1  
E-mail: obrazum@yandex.ru