

I. ÖPIK

**ÜBER DIE VERWENDUNG VON BRENNSCHIEFER
UND BRENNSCHIEFERASCHE BEIM KLINKERBRENNEN**

И. П. ЭПИК

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГОРЮЧИХ СЛАНЦЕВ И ИХ ЗОЛЫ
ПРИ ОБЖИГЕ ПОРТЛАНДЦЕМЕНТНОГО КЛИНКЕРА**

Neben den Problemen der Verwendung von Brennschieferasche als Mahl-zusatz zum Portlandzement-Klinker (ungefähr mit 70—75 % Klinker), der mit Posidonien-Ölschieferasche zu Ölschieferasche-Zement und mit estnischer Kukersit-Brennschieferasche zu Brennschieferasche-Portlandzement verarbeitet wird [1—4], hat man verhältnismäßig wenig die Probleme des Einsatzes von kalksteinreichem Brennschiefer oder dessen Asche bzw. als Brennstoff oder Rohmehlkomponent besprochen.

Im Kreis der Brennstoffasche-Verwerter kann man manchmal nicht-exakte Vorstellungen von Brennschiefer (Ölschiefer) treffen. Darum ist es nicht überflüssig zu bemerken, daß Ausdrücke, wie bituminöser Schiefer oder bituminöser Kalkstein keine Berechtigung haben, weil im Rohstein kein fertig gebildetes Bitumen vorliegt [5, 6]. Die Bezeichnung Brennschiefer hebt die kaustobiolithischen Eigenschaften hervor, und Ölschiefer — den Rohstoff des Ölgewerbes.* Die schiefrige Beschaffenheit hängt mit der Schichtung zusammen.

Beim Klinkerbrennen werden der Posidonien-Ölschiefer der Schwäbischen Alb sowie der estnische Brennschiefer der Kukruse-Stufe verwendet. Die Verwendung von Brennschieferasche als Rohstoff und Brennschiefer als Brennstoff oder Rohmehlkomponent zum Klinkerbrennen ist in verschiedenen Varianten vorstellbar. Die wichtigsten von diesen könnten folgende sein:

**1. Direktes Einblasen von Brennschieferstaub als Brennstoff
in die Sinterzone des Drehofens**

Die Voraussetzungen für das direkte Einblasen von Brennschieferstaub als Brennstoff in die Sinterzone eines Drehofens sind, erstens, ein Heizwert des Schiefers über ein Minimum, um die nötige Brenntemperatur zu erreichen, und, zweitens, eine passende Aschezusammensetzung. Je höher der Heizwert liegt, desto mehr kann die Aschezusammensetzung von der des Zementklinkers sich unterscheiden, denn mit der Erhöhung des Heizwertes sinkt die zusätzliche Aschenmenge, die im Ofen mit dem Rohmehl vermischt werden soll.

* Folgend werden beide Bezeichnungen als gleichwertige Begriffe verwendet.

Direktes Einblasen von Brennschieferstaub als Brennstoff für Klinkerbrennen wurde schon seit 1917—1921 in zwei F. L. Smidth-Drehöfen von $2,4/2,2 \times 45$ m für das Naßverfahren im Zementwerk Port-Kunda in Estland eingeführt [7—9]. Die genannten Drehöfen wurden im Jahre 1912 angelegt, mit Steinkohlenstaubfeuerung ausgerüstet und fuhren nachher mit Brennschieferstaub bis zum Jahre 1964. Nach der Einsetzung von neuen Drehöfen (auch für das Naßverfahren und mit Schieferstaubfeuerung, 4×150 m) der Zementanlagenbau Dessau [10] wurden die alten Öfen abgebaut.

Der Heizwert der Trockensubstanz des für Klinkerbrennen aufbereiteten (angereicherten) Brennschiefers, mit inbegriffenem Wärmeverbrauch für das Entsäuern eigener CaO und MgO sowie für das Abspalten von Tonwasser, liegt bei 11,3 MJ/kg. Die Trockensubstanz enthält rund 31 % Kerogen (organische Substanz), rund 42 % CaO und 4 % MgO und 23 % Tonmineralien, Quarz und FeS₂. Damit ist eine spezifische Aschenmenge rund 43 g/MJ vorhanden.

Beim spezifischen Wärmeverbrauch eines Naßverfahren-Drehofens 5,5—6,7 MJ pro 1 kg Klinker wird die Einsatzmenge der Asche im Drehofen 230—290 g in 1 kg Klinker sein. Da der Schiefer trocken in den Ofen eingeblasen wird, kann man beim Naßverfahren mit einer Verminderung des spezifischen Wärmeverbrauches rechnen (mit dem genannten Brennschiefer um etwa 10—12 %).

Zur Zeit muß man auch mit möglichen Heizwertverringerungen rechnen, die von dem Schiefergruben-Betrieb ausgehen können.

Es sei erwähnt, daß 1962 beim Überführen der ersten 4×150 -m-Drehöfen im Zementwerk Kunda von der provisorischen Heizölfeuerung zum Klinkerbrennen mit Brennschieferstaub die Schwankungen des laufenden Staubzuflusses zum Oferbrenner beachtliche Betriebsschwierigkeiten durch der veränderlichen Zuführung der Brennstoffasche als Rohstoff verursachten.

2. Zugabe von Brennschiefer für Kalksteinentsäuerung

Der Posidonienschiefer hat einen äußerst niedrigen Heizwert, 3,4—4 MJ/kg. Nach Rudolf Rohrbach ist der Heizwert für die Trockensubstanz mit inbegriffenem Wärmeverbrauch für das Abspalten von Tonwasser und für Entsäuerung der Karbonate rund 4 MJ/kg [1]. Die Trockensubstanz des Schiefers besitzt 11 % Kerogen, 41 % CaO, 3 % MgO und 45 % Tonsubstanz, Sand und FeS₂. Damit wird die Flammentemperatur für Klinkerbrennen wegen der Erwärmung der Brennstoffasche und Entsäuerung des Brennstoffkalksteines in der Sinterzone des Drehofens unzureichend. Sehr hoch ist die spezifische Aschenmenge pro Brennstoffwärme, 175 g/MJ, rund viermal höher als beim estnischen Brennschiefer.

Das Zementwerk Dotternhausen in der Nähe der Posidonienschiefer-Lagerstätte hatte diesen Schiefer zur Verfügung, nachdem ein Kraftwerk mit Brennschieferfeuerung wegen Unwirtschaftlichkeit stillgesetzt wurde [11—13]. Die Verwendung von Brennschiefer wurde mit einem fünfstufigen Wärmetauscherofen gelöst, bei dem der Schieferstaub mit vorgewärmter Verbrennungsluft und mit zusätzlichem Kalksteinmehl nach kurzen Drehrohr 4×56 m in einen senkrechten Brennschacht eingeführt wird (Abb. 1). Die fünfte Vorwärmer-Zyklonstufe, die praktisch keinen Wärmetauscheffekt mehr hatte, diente der Nachmischung des im Verbrennungsschacht vorgemischten Gutes. Das Brennen in der Sinterzone wird mit Kohlenstaub, wahlweise mit schweren Heizöl durchgeführt, wobei mit der brennbaren Substanz (Kerogen) des Schiefers

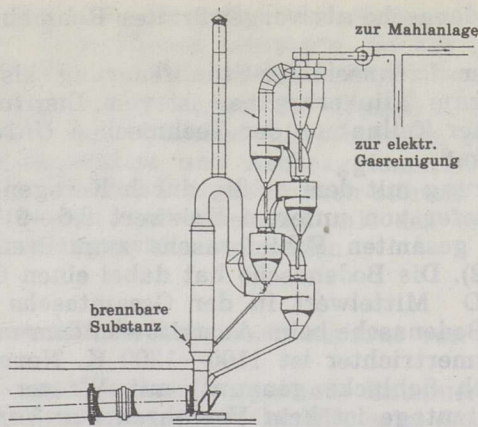


Abb. 1. Schema des fünfstufigen Zyklonwärmetauschers, System Dotternhausen (Humboldt), zum Drehofen 4×56 m [11]. Brennbare Substanz: Posidonien-Ülschiefer

Рис. 1. Схема декарбонизационной установки вращающейся печи 4×56 м на заводе «Доттернгаузен» [11]

Brennstoff gespart wird. Theoretisch ist für die Entsäuerung des Kalksteines ungefähr $0,5$ kg Posidonien-schiefer pro 1 kg Klinker nötig, wobei der Einsatz der Schieferasche pro 1 kg Klinker rund 365 g ist.

Beim Trockenverfahren und mit Heizöl- oder Naturgasverbrennung in der Sinterzone eignet sich das Schema Dotternhausen auch für den kerogenreichen estnischen Brennschiefer mit einem geringen Einsatz von rund 80 g Asche pro 1 kg Klinker. In diesem Fall wird es auch möglich sein, den hoch angereicherten Brennschiefer (Heizwert $11,3$ MJ/kg) durch den für Kraftwerke mäßig angereicherten ($8,6$ — 9 MJ/kg) estnischen Brennschiefer oder sogar nicht angereicherten Hauwerk ($6,5$ — $6,9$ MJ/kg) zu ersetzen. Im letzteren Fall wird der Einsatz der Asche etwa 130 — 140 g pro 1 kg Klinker sein.

3. Klinker aus einer Schmelzkammerfeuerung

Anfang der 60er Jahre wurde im Heizkraftwerk Kohtla-Järve eine 6 MW_{th} Versuchsanlage zur Gewinnung von Portlandzement mit einer Zyklon-Schmelzfeuerung gebaut, die mit Verbrennungsluft-Vorwärmung bis 1000 K und mit Sauerstoffzugabe ausgerüstet wurde. Das als Brenn- und Rohstoff gefeuerte Brennschiefer-Hauwerk ($6,5$ — $6,9$ MJ/kg) hatte einen hohen Gehalt von CaO (60 — 63 %) in der Laborasche. Die abgekühlte, flüssig von Schmelzkammerboden abgezogene Schlacke wurde zum Portlandzement gemahlen [14, 15]. Doch der sehr hohe Aschefießpunkt 2075 — 2150 K machte eine äußerst hohe Feuerraumtemperatur — 2300 K und mehr — nötig, die nur mit sehr hoher Luftvorwärmung von über 1000 K und mit Sauerstoff-Zusatz in der Verbrennungsluft erreichbar war. Da diese Maßnahmen unwirtschaftlich teuer sind, wurden weitere Entwicklungen dieser Methode, «Energoklinker-Verfahren» genannt, abgestellt.

Es wäre noch zu bemerken, daß ein Dampfkessel mit einer Schmelzfeuerung für die Klinkerproduktion keine Belastungsschwankungen erträgt und somit nur in der Basis betrieben werden kann. Aber die in der Basis produzierte Elektroenergie ist minderwertiger und wird billiger verkauft als die Energie, die nach dem Bedürfnis der Energieabnehmer generiert wird.

4. Staubfeuerung-Bodenasche als vorgewärmtes Rohmehlkomponent

Die Bodenasche einer Brennschiefer-Staubfeuerung als vorgewärmtes Rohmehlkomponent zum Klinkerbrennen ist vom Institut für Baugrobkeramik Laatzten unter Teilnahme der Technischen Universität Tallinn vorgeschlagen worden.*

Bei der Staubfeuerung mit dem mäßig durch Kerogen angereicherten estnischen Brennschiefer von unterem Heizwert 8,6—9 MJ/kg, werden ungefähr 30 % der gesamten Schieferasche zum Brennkammerboden abgeschieden (Abb. 2). Die Bodenasche hat dabei einen Gehalt von CaO über 53 % beim CaO Mittelwert in der Gesamtasche von 47—48 %. Die Temperatur der Bodenasche beim Austritt von dem mit Kesselrohren gekühlten Brennkammertrichter ist 1100—1200 K. Normalerweise wird die Bodenasche (auch Schlacke genannt) mit Wasser abgekühlt und abgeschwämmt. Heutzutage ist kein Verfahren zur Verwertung dieses Resiststoffes angewendet worden.

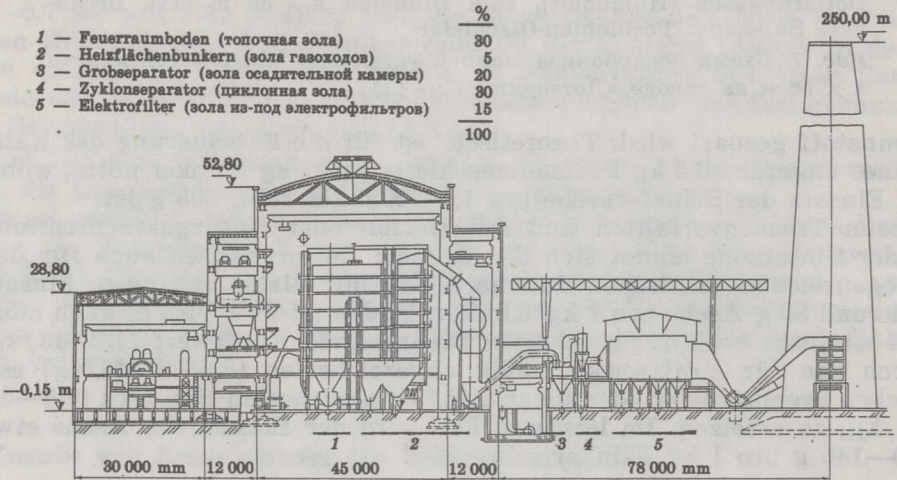


Abb. 2. Anteile der einzelnen Aschenabzüge von der gesamt abgeschiedener Asche einer Kesselanlage im Brennschieferkraftwerk [4]

Рис. 2. Схема котельной установки сланцевой ТЭС с указанием мест отбора золы [4]

Es wird ein Nachbrennen der heißen Bodenasche mit einem korrigierenden Kalksteinmehlzusatz und anderen Ergänzungen in einen kurzen Drehofen mit Hilfe eines zusätzlichen Brennstoffes (Heizöl, Naturgas, möglicherweise auch angereicherter Brennschiefer) vorgeschlagen. Das Ergebnis wird Portlandzement-Klinker sein.

Die geschilderte Verfahrensordnung ist energie- und rohstoffsparend. Gespart werden Strom für Kalksteinmahlung, Wärme zur hohen Vorwärmung des Gutes und zur Kalkstein-Entsäuerung. Es besteht auch eine Möglichkeit der Verwertung der Abgaswärme in der Kesselanlage. Das Schema hat aber auch Mängel, die man nicht außer Acht lassen kann:

1) Ebenso, wie im Fall der Schmelzfeuerung, muß hier der Dampfkessel ohne Lastschwankungen laufen, um eine stabile Qualität des Klinkers einzuhalten.

* Entwicklungsgesellschaft für Mineralstoffe MBH. Resiststoffverwertung der Heizkraftwerke mit Brennstoffeintrag aus Ölhaltigen Kalkstein. Bericht. Laatzten, 1990.

2) Der Zusammenbau des Dampfkessels mit dem Drehofen und Klinkerkühler hat keine vorbildlichen Lösungen. So hat man mit einem technischen Risiko zu tun, was zum kostspieligen Umbauen usw. führen kann.

3) Von den Brennkammerwänden der Kesselanlage können bei ihrer Reinigung während des Betriebes mit Abblasen, Abwaschen und Rütteln große Schlackeansätze und Ascheagglomerate in den Bodentrichter herunterfallen, die bei Klinkerbrennen störend wirken können. Diesen Mangel kann man wahrscheinlich mit den oft durchzuführenden sorgfältigen Reinigungszyklen vermeiden.

5. Klinkerbrennen mit Ascheneinsatz separat von der Kesselanlage

Um die in der Kesselfeuerung vorgehende Entsäuerung der Brennschieferasche auszunützen, kann es zweckmäßig sein, das Klinkerbrennen mit Ascheneinsatz auch separat von den Kraftwerkskesseln auszuführen, obwohl dabei die hohe Rohmehl-Vorwärmung abfällt. Die Aschenförderung im heißen Zustand ist kaum wirtschaftlich zu lösen.

Für die Bodenasche mit 53 % CaO wird der zusätzlich Anteil von Kalkmehl ungefähr 30—33 % sei. Das bedingt eine Zumischung von 0,7—0,8 kg Kalksteinmehl zu 1 kg Bodenasche, womit eine Abkühlung der Bodenasche mit Einmischung von Kalksteinmehl z. B. in einer Förderschnecke möglich wäre. Das läßt die Temperatur des Gemisches auf rund 800 K sinken, ohne dabei mit dem Wärmeverbrauch für Entsäuerung des zusätzlichen Kalksteines zu rechnen. Die Temperatur unter 1100—1200 K ist zu niedrig, um eine weitgehende Entsäuerung des Zusatzes zu erwarten.

Kein Problem ist eine trockene Förderung der Grobseparator- und Zyklonasche. Aber der bescheidene Gehalt an CaO, rund 47—48 %, benötigt einen grossen Einsatz (rund 40 %) von zusätzlichem Kalkmehl. Ob sich eine Förderung per Asche der Eisenbahn vom Kraftwerk auf ein Zementwerk lohnt, muß noch wirtschaftlich nachgerechnet werden.

6. Aschenverwertung ohne Anreicherung des estnischen Brennschiefers für Kraftwerke

Der zum Abbau geeignete Teil der beinahe horizontal gelegenen Kukersitstufe mit einer Dicke bis etwa 3,3 m besteht aus kerogenreichen Einzelschichten (Flöze A bis F) und kalksteinreichen Zwischenlagen, die 70—85 % kohlen-sauren Kalk, etwa 8—10 % terrigene Stoffe (Tonminerale usw.) und bis 8 % Kerogen enthalten. Ein Teil der kalkreichen Zwischenlagen wird beim Abbau von den Hauwerk getrennt und in der Grube liegen gelassen oder in Aufbereitungsanlagen als Abgänge getrennt, so daß zur Lieferung für die Kraftwerke ein mit Kerogen mäßig angereichertes Material mit einem Heizwert 8,6—9 MJ/kg zur Verfügung steht. Dabei ist in der Laborasche mit einem Gehalt von CaO + MgO 51,5—52,5 % zu rechnen. Wird aber das Hauwerk mit allen kalksteinreichen Zwischenlagen gefördert, das heißt ohne Aufbereitung, bekommt man eine Produktion mit einem niedrigen Heizwert von 6,5—6,9 MJ/kg.

Der CaO-Gehalt der Brennschieferasche erhöht sich mit Verringerung des Heizwertes, weil die Aufbereitung des Brennschiefers durch die Kalksteinentfernung ausgeführt wird. Der Gehalt von CaO + MgO der Asche des nicht angereicherten Brennschiefers wird bei 61—62 % liegen (Tabelle). Die vom Feuerraumboden abgeführte Asche einer Staubfeuerung wird einen ungefähr 2—3 % höheren CaO-Gehalt als die mitt-

Eine Kalkulation der Brennschieferförderung in Estland für die Jahre 2000—2030 (Qualität und relative Betriebskosten)*

Оценка сланцевдобычи в Эстонии на 2000—2030 г. (показатели качества добываемых ГС и относительные производственные расходы)

	Tagebau				Untertagebau			
	Sirgala	Narva	Oktoobri	Viru	Ahtme	Estonia		
Selektive Gewinnung	Aufbereitungsanlagen							
Betriebsdauer nach anno 2000, Jahre	26—31	17—20	14—15	34—35	7—8	21—24		
Angereicherte Produktion								
Jahresproduktion:								
Masse, 10 ⁶ t	5,90	2,28	3,00	1,65	1,55	5,15		
Wärme, 10 ⁶ GJ	52,4	19,7	28,0	17,3	15,7	49,7		
Gesamtasche, 10 ⁶ t	2,69	1,03	1,35	0,71	0,68	2,29		
Heizwert, MJ/kg	8,88	8,65	9,30	10,5	10,1	9,66		
CaO + MgO in Asche**, %	52	52,5	51	48	49	49,5		
Produktion ohne Anreicherung (Hauwerk)								
Jahresproduktion:								
Masse, 10 ⁶ t	8,7	3,4	4,4	2,6	2,5	8,3		
Wärme, 10 ⁶ GJ	59,2	22,1	28,6	17,7	16,8	54,0		
Gesamtasche, 10 ⁶ t	4,3	1,7	2,2	1,3	1,2	4,1		
Heizwert, MJ/kg	6,8	6,5	6,5	6,8	6,7	6,5		
CaO + MgO in Asche**, %	61	62	62	61	61,5	62		
Senkung der Betriebskosten pro GJ kontra angereicherte Produktion, %								
	3	2	19	11	15	17		

* Nach E. Reinsalu (Institut für Geologie, Estnische Akademie d. Wiss. Schriftsatz, 1990).

** Nach [16].

lere Laborasche haben. Die in Zyklonen abgesetzte Flugasche beim nachfolgenden Elektrofaltern wird wahrscheinlich der mittleren Laborasche nahe sein. Wegen der Entweichung beim Klinkerbrennen unter Dauerwirkung einer Temperatur von 1675—1725 K einiger leichtflüchtigen Schwefel- und Kaliumverbindungen, die in der Feuerraumboden- und Zyklonasche vorhanden sind, erhöht sich der CaO-Gehalt im Klinker noch zusätzlich um 2—3 %. So kann man mit großer Sicherheit beschließen, daß bei der Verbrennung in einer Staubfeuerung mit dem nicht aufbereiteten estnischen Brennschiefer kein zusätzliches Kalksteinmehl zur Feuerraum-Bodenasche sowie für Zyklonasche zum Klinkerbrennen nötig ist.

Ob sich aber eine Verbrennung von nicht aufbereitetem Brennschiefer in dieser Hinsicht lohnen wird, muß noch wirtschaftlich und auch von der kraftwerkstechnischen Seite nachgeforscht werden. Der Zweifel besteht in der Tatsache, daß die Senkung des Wärmepreises bei Ablassen der Anreicherung des Hauwerkes bei Abbau der Flöze sehr gering zu Gunsten der Kraftwerke sein wird, nur 2—3 % (Tabelle, Tagebau "Sirgala" und "Narva"). Eine höhere Senkung der Betriebskosten, um 11—19 % für Tagebau "Oktoobri" und bei der Untertageförderung (Tabelle) ist durch Abstellen von speziellen Aufbereitungsanlagen zu erklären, die den grobstückigen (+25 mm) Brennschiefer für Ölgewinnung und auch als Brennstoff zur Sinterzone der Klinker-Drehöfen anreichern.

Da die Betriebskosten pro Wärmeeinheit in der Grube nur um 2—3 % sinken, darf man am Kraftwerk bei der Verbrennung von Hauwerk eine Erhöhung der gesamten Betriebskosten erwarten. Schon mit einer Eisenbahnförderung um 20—30 km geht dieser kleine Vorteil verloren. Dazu kommen aber noch Zukosten von erhöhtem Energiebedarf zur Förderung und Vermahlen des Gutes am Kraftwerk sowie von einer Verminderung des Kesselwirkungsgrades und durch gesteigerten Verschleiß der ganzen Kesselanlage. Ob diese zusätzliche Mehrkosten von dem Gewinn an Zementklinkerherstellung übertoffen werden, muß noch ordentlich nachgeprüft werden.

Zu einem Vorteil der Verbrennung von Brennschiefer-Hauwerk für die Zukunft (nach anno 2000—2005) kann eine Verminderung der Energieproduktion der Brennschieferkraftwerke werden, die vom teilweisen Übergang zur Kernenergie verursacht wird. Sämtliche Betrachtungen der estnischen Energiewirtschaft lassen einen solchen Vorgang prognostizieren. In diesem Fall wird ein teilweiser oder völliger Übergang zur Verbrennung von nicht angereichertem Brennschiefer die von der Energieproduktion bedingte Verminderung der Lieferung der Asche an die Landwirtschaft der UdSSR und für die Bauindustrie kompensieren.

7. Verwendung der Aufbereitungsrückstände

Die Aufbereitungsrückstände der Brennschieferförderung in Estland und im Revier Leningrad haben einen geringen Gehalt an Kerogen (3—8 %) und können deshalb wegen dessen Verschmelzung und Explosionsgefahr in einer Niedertemperaturzone nicht als ein Rohmehlkomponent für Klinkerbrennen eingesetzt werden. Die Aufbereitungsrückstände haben einen Heizwert der Rohsubstanz im mittel etwa 1,8 MJ/kg und einen Gehalt an CaO im Glührückstand rund 76 %.

Im Zementwert Slantsy (Brennschiefer-Revier Leningrad) wird ein Verfahren zur Verwertung dieses Rückstandes und dessen Verbrennungswärme entwickelt, das ähnlich der Schema Dotternhausen ist. Die Aufbereitungsrückstände sollen in einem Rohmehl-Entsäuerungsreaktor

eines Drehofensystems bei genügend hoher Temperatur ohne Explosionsgefahr ausgebrannt werden. Dabei wird eine Senkung des gesamten Wärmeverbrauches bei Klinkerbrennen um etwa 0,85 MJ pro 1 kg Klinker erwartet [17].

РЕЗЮМЕ

Вопросы использования при обжиге портландцементного клинкера горючих сланцев (ГС) в качестве топлива, а также сланцевой золы в качестве сырья относительно мало освещены в научной литературе. Для этих целей использовались и используются ГС Эстонского месторождения и позидонские ГС, добываемые на западе Германии. Ниже рассмотрено шесть вариантов решения этого вопроса.

1. Сжигание сланцевой пыли в качестве топлива во вращающихся печах в зоне обжига клинкера

Предпосылками для применения этого метода являются высокая удельная теплота сгорания и подходящий состав минеральной части топлива. На цементном заводе в Кунда с 1917 по 1964 г. на сланцевом топливе работали две построенные в 1912 г. печи $2,4/2,2 \times 45$ м, которые впоследствии были заменены мощными печами «ФЕВ Дессау» 4×150 м, работающими на этом же топливе [7—10]. Удельная теплота сгорания сланцев, сжигаемых в настоящее время при обжиге, благодаря обогащению при добыче высокая — 11,3 МДж/кг на сухую массу. Приведенное количество золы составляет около 43 г/МДж, а в клинкер в печах примешивается при данном мокром способе приготовления сырьевой смеси 230—290 г золы на 1 кг клинкера.

2. Использование ГС и отходов их обогащения для декарбонизации сухой сырьевой смеси

Таким образом использовались позидонские ГС, имевшие крайне низкую удельную теплоту сгорания (4 МДж/кг на сухую массу) при высоком, как и у эстонских ГС, содержании СаО в золе (46 %). Приведенная зольность этих сланцев составляет более 175 г/МДж. Разложение карбонатов топлива в зоне горения (обжига), а также расход тепла на нагревание золы понижают температуру факела настолько, что топливо не может быть использовано для обжига. Поэтому на цементном заводе «Доттернгаузен» (Германия) пыль позидонских ГС вместе с подогретым воздухом подается в вертикальную шахту за короткой вращающейся печью сухого метода 4×56 м (рис. 1), где сырьевая смесь декарбонизируется за счет теплоты сгорания ГС [11, 12]. Обжиг производится жидким топливом.

Схема «Доттернгаузен» в принципе может быть применена для эстонских низкокалорийных энергетических сланцев или сланцев валовой выемки с рабочей удельной теплотой сгорания соответственно 8,9—9 и 6,5—6,9 МДж/кг.

Использование теплоты горения керогена известняковых отходов добычи и обогащения ГС Ленинградского месторождения в декарбонизаторе запечной системы вращающейся печи внедряется в настоящее время институтом «Гипроцемент» на Сланцевском цементном заводе (Ленинградская обл.). Рабочая удельная теплота сгорания этих отходов составляет в среднем 1,8 МДж/кг, содержание СаО в золе около 76 %. Замена известняка керогенсодержащими известняковыми отходами приведет к снижению удельного расхода тепла при обжиге клинкера на 0,85 МДж/кг [16].

3. Производство клинкера из жидкого шлака эстонских сланцев валовой выемки

В 60-х гг. на ТЭЦ «Кохтла-Ярве» была сооружена опытная циклонная топка с жидким шлакоудалением и тепловой мощностью 6 МВт для выработки из золы эстонских ГС валовой выемки плавящего портландцементного клинкера, названного энергоклинкером [13, 14].

Однако высокая температура плавления золы, содержащей 60—63 % СаО, — 2075—2150 К, которая обуславливала необходимость иметь в топке темпера-

туру выше 2300 К, и низкая рабочая удельная теплота сгорания топлива (6,5—6,9 МДж/кг) препятствовали промышленному внедрению этого метода, требовавшего дорогостоящих мероприятий, в частности обогащения дутья кислородом и предельно высокого подогрева воздуха.

4. Использование горячей декарбонизированной золы из-под топки пылесланцевого котла

Схема котла с указанием мест отбора золы представлена на рис. 2. Относительные количества золы даны ориентировочно [4]. Повышенное содержание СаО в топочной золе, глубокая её декарбонизация и температура на выходе 1100—1200 К позволяют с минимальными затратами тепла и корректировкой состава сырьевой смеси получать в короткой вращающейся печи портландцементный клинкер (предложение Института строительной керамики, г. Лаатпен). Недостатки предложенного метода — отсутствие проверенного (надежного) конструктивного решения соединения топочной камеры котла и вращающейся печи и необходимость работы котла по «цементному графику», то есть без учета колебаний в потреблении пара.

5. Составление сырьевой смеси из золы независимо от работающей котельной установки

В этом случае основная проблема заключается в сухом охлаждении топочной золы (рис. 2), которая в настоящее время охлаждается водой, смывается в системе ГЗУ и не утилизируется. Рассматривается возможность охлаждения этой золы с размолотым известняком в специальном шнеке под топочной воронкой.

Содержание СаО в золе (около 53 %) таково, что для получения клинкерной сырьевой смеси необходимо к 1 кг золы добавлять 0,7—0,8 кг известнякового порошка. Практических опытов по этому методу нет.

6. Использование золы, получаемой при сжигании эстонских сланцев валовой выемки

Эстонские сланцы валовой выемки из разных разрезов и шахт имеют рабочую удельную теплоту сгорания 6,5—6,9 МДж/кг и суммарное содержание оксидов кальция и магния в лабораторной золе 61—62 % против 8,6—9 МДж/кг и 51,5—52,5 %, характеризующих добываемые в настоящее время энергетические ГС. Учитывая улетучивание части сернистых и калиевых соединений при обжиге клинкера, а также селективное осаждение более богатой СаО части золы в топке и в установках грубой очистки (рис. 2), можно с большой вероятностью ожидать, что топочная зола, а также осажденная в ступенях грубой очистки летучая зола могут быть использованы в сырьевых смесях для обжига без добавки дополнительного известняка.

Как видно из таблицы, где приведены прогнозные показатели для эстонских сланцевых шахт и разрезов (запасы которых позволят им работать в начале XXI в.), себестоимость единицы теплоты в случае валовой выемки ГС только на 2—3 % меньше, чем при селективной выемке энергетического сланца. Этот выигрыш теряется уже при железнодорожной перевозке на расстояние 20—30 км, не говоря уже о повышенных эксплуатационных расходах на ТЭС. Поэтому перспектива использования эстонских ГС валовой выемки на ТЭС зависит от экономики использования золы. Последний вопрос пока еще недостаточно изучен.

LITERATUR

1. *Rohrbach R.* Herstellung von Ölschieferzement und Gewinnung elektrischer Energie aus Ölschiefer nach dem Rohrbach-Lurgi-Verfahren // Zement-Kalk-Gips. 1969. Nr. 7.
2. *Kikas V. H.* Application of shale ash in the building materials industry // UN Symp. of Oil Shale Resources. Tallinn, 1968.
3. *Kikas V. H.* Hochwertige Flugaschenzemente // 6. Intern. Zementchemie-Kongress. 1976. Band 3.

4. *Kikas V. H.* Mineral matter of kukersite oil shale and its utilization // Oil Shale. 1988. V. 5, N 1.
5. *Õpik A.* Aufriss und Aufbau der Kuckersit-Stufe // Der estländische Brennschiefer. / Herausgegeben von H. Winkler. Reval, 1930.
6. *Urov K., Gorky Y.* On the content of the terms "oil shale" and "kerogen" // Oil Shale. 1984. V. 1, N 1.
7. *Raud M.* Portland-tsemendi põletamine kukersiidiga // Eesti Tehnika Seltsi Tehn. Ringv. 1919. Nr. 1.
8. *Raud M.* Põlevkivi ja põlevkivi-tööstus Eestis. — Tartu; Tallinn, 1925.
9. *Grauen A.* Eesti tsemenditööstuse edusamme // Keemia Teated. 1935. Nr. 3.
10. *Tillemann H.* Tsemenditehase «Punane Kunda» rekonstrueerimisest // Ehitus ja arhitektuur. 1963. Nr. 3.
11. *Frankenberger R.* Die Brennverfahren der Zementindustrie // Zement-Kalk-Gips. 1968. Nr. 2.
12. *Rechmeier H.* Der fünfstufige Wärmetauscherofen zum Brennen von Klinker aus Kalkstein und Ölschiefer // Ibid. 1970. Nr. 6.
13. *Riedhammer M.* Abbau und Verarbeitung von Ölschiefer zur gezielten Herstellung hochwertiger Ölschieferzemente // Ibid. 1987. Nr. 8.
14. *Tager S. A.* Об использовании минеральной части топлива на электростанциях // Электрические станции. 1965. № 12.
15. *Tager S. A. et al.* Burning Baltic oil shale with liquid-phase slag removal and production of cement // UN Symp. of Oil Shale Resources. Tallinn, 1968.
16. *Мякюла О. Э., Отс А. А.* Определение состава сланцев по теплоте сгорания // Труды Таллиннского политех. ин-та. 1977. № 416.
17. *Фрайман Л. С., Йогансон А. К.* Использование известняков — остатков добычи и обогащения горючего сланца — в производстве цемента // Горючие сланцы. 1989. Т. 6. № 3.

*Estnische Akademie der Wissenschaften
Tallinn*

Eingetroffen 15.06.90

*Академия наук Эстонии
г. Таллинн*

Поступила в редакцию
15.06.90