

## ТЕПЛОТЕХНІЧНИЙ РОЗРАХУНОК ЦЕМЕНТНОЇ ОБЕРТОВОЇ ПЕЧІ З ВИКОРИСТАННЯМ АЛЬТЕРНАТИВНОГО ПАЛИВА

© Круць Т.М., Федунь Б.В., Саницький М.А., 2010

Наведено результати теплотехнічного розрахунку теплового агрегату сухого способу виробництва цементу з використанням альтернативних видів палива. Показано енергетичну ефективність реконструкції теплового агрегату мокрого способу виробництва цементу на сухий.

The results of heating engineering calculation of thermal aggregate of dry method of production of cement are presented with the use of alternative fuels. Efficiency of thermal aggregate of the wet method of production of cement of dry is shown.

**Вступ.** Цементні заводи України, переважно, працюють за мокрим способом виробництва, де витрата палива на випал портландцементного клінкеру є вдвічі вищою порівняно з витратами на сучасних виробництвах сухого способу. Щоб забезпечити конкурентоспроможність галузі, у цементній промисловості Європи ще близько 30 років тому почали пошуки нових джерел і видів енергії, і цей рух останнім часом розширювався в міру того, як необхідність забезпечення «стійкості» виробництва зумовила в цементній промисловості спроби підвищувати енергетичну ефективність виробництва в поєднанні з необхідністю збереження невідновлюючих енергетичних джерел, запаси яких щороку зменшуються. На цементних заводах здійснюють реконструкцію технологічних ниток, заміну природного газу альтернативними видами палива (вугілля, торф) та нетрадиційними, що отримують з горючих відходів виробництва та споживання.

**Постановка проблеми.** Високий рівень споживання палива під час випалу портландцементного клінкеру та постійне зростання цін на технологічне паливо є однією з головних причин економічної кризи, яку переживають практично всі діючі заводи України. При річному виробництві портландцементу в Україні на рівні 13 млн. тонн витрата енергії тільки на випал клінкеру становить 85 млн ГДж або в перерахунку на природний газ – понад 2,0 млрд. м<sup>3</sup>. Такий стан змушує виробників цементу шукати шляхи зниження енерговитрат на виробництво цементу, проводити реконструкцію технологічних ниток, з переведенням їх на сухий спосіб виробництва, а також шукати дешеві види місцевого палива, яким може бути кам'яне вугілля, торф і горючі відходи промисловості та життєдіяльності людини. Характерно, що в деяких країнах, за активної державної підтримки, вже більше 30 років горючі відходи переробляють в альтернативне паливо за умов дотримання жорстких вимог щодо вхідних матеріалів і контролю процесу та емісії. У Західній Європі за рахунок альтернативних теплоносіїв покривається до 20–40 % від загальної потреби палива в цементній промисловості.

Переведення технологічної нитки цементного заводу з мокрого на сухий спосіб зумовлює не тільки істотне зниження витрати теплоти на випал, а й дозволяє значно підвищити її продуктивність. Сучасні теплові агрегати сухого способу виробництва клінкеру обладнані запічними теплообмінниками, а найбільше напружена теплова зона декарбонізації виноситься за межі обертової печі в запічний агрегат-декарбонізатор, в якому спалюється частина палива [1].

Метою ВАТ «Івано-Франківськцемент» було перевести одну технологічну нитку з мокрого на сухий спосіб із застосуванням як паливо вугілля взамін природного газу. Це вимагало проведення попередніх теплотехнічних розрахунків теплового агрегату, а саме: розрахунку горіння палива та теплового балансу агрегату, що дозволяє визначити витрати палива на випал клінкеру та обґрунтувати економічну доцільність переходу від спалювання природного газу до альтернативних видів палива.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Сухий спосіб виробництва цементу вигідно відрізняється від мокрого питомою витратою теплоти на випал клінкеру. Ці витрати під час виробництва клінкеру за сухим способом становлять 3200–4500 кДж/кг клінкеру, у той час як за мокрим способом вони становлять 6100–7200 кДж [2]. Отже, переведення заводу з діючого мокрого способу на сухий з використанням альтернативних видів палива (вугілля, торф, горючі відходи), запаси яких в Україні є значними, а вартість порівняно з природним газом нижчою, є актуальними, але вимагає додаткових досліджень і розрахунків, позаяк вугілля і нетрадиційні види палива після спалювання залишають золу, присадження якої до клінкеру вносить корективи в його хімічний і мінералогічний склад, що зрештою відображається на властивостях цементу.

З іншого боку, в природі рідко знаходиться кам'яне вугілля, яке за своїм складом відповідає вимогам до твердого палива для обертових цементних печей. Як правило таке паливо готується з двох і більше сортів вугілля і вимагає відповідних розрахунків [3].

Перехід на сухий спосіб виробництва цементу вирішує не тільки проблему енергозбереження (табл. 1), а й дає змогу скоротити викиди димових газів у довкілля.

Таблиця 1

**Витрати теплоти на отримання 1 кг клінкеру за статтями теплових балансів обертових печей**

Статті витрат теплоти	Сухий спосіб виробництва цементу	Мокрий спосіб виробництва цементу
Теоретична витрата теплоти на клінкероутворення, кДж	1739,0	16930,0
Витрата теплоти з тепло виносом, кДж	12,6	8,4
Витрата теплоти на випаровування вологи, кДж	21,0	2702,5
Витрата теплоти з відхідними газами, кДж	628,5	1072,6
Втрата теплоти з повітрям холодильника, кДж	328,8	-
Втрата теплоти з клінкером, кДж	142,4	259,8
Втрата теплоти в довкілля, кДж	272,4	737,4
Всього, кДж	3144,7	6470,7

Об'єм пічних газів на 1 т клінкеру за сухим способом становить 1323 м<sup>3</sup>. Об'єм продуктів згорання під час спалювання природного газу теплотворної здатності 29300 кДж/м<sup>3</sup> становить 1040 м<sup>3</sup> при витраті теплоти на отримання 1 т клінкеру 3144 кДж (табл. 1). З сировинної суміші отримується 283 м<sup>3</sup> CO<sub>2</sub>. Разом – 1323 м<sup>3</sup>.

За мокрим способом виробництва у разі витрати теплоти 6470 кДж на одну тонну клінкеру об'єм продуктів згорання від спалювання природного газу такої самої теплотворної здатності, як і за сухого способу становить 1730 м<sup>3</sup> плюс 283 м<sup>3</sup> CO<sub>2</sub> з сировинної суміші та 1050 м<sup>3</sup> водяної пари з шламу, що становить 3066 м<sup>3</sup> або на 1745 м<sup>3</sup> більше, ніж за сухим способом. Отже, у разі переходу з мокрого на сухий спосіб отримуємо значну економію теплоти та зниження в 2–3 рази викидів відхідних газів. Якщо замінити природний газ на кам'яне вугілля, то, крім зниження вартості і залежності від іноземних імпортерів, отримується зменшення обсягу продуктів згорання.

Відомо, що під час спалювання вугілля, рідкого палива і природного газу виділяється різний обсяг продуктів згорання на однакову кількість теплових одиниць. Так, під час спалювання різного палива з надлишком повітря 10 % на 4187 кДж теплоти з вугілля виділяється 1,24 м<sup>3</sup>, з мазуту – 1,31 м<sup>3</sup>, з природного газу – 1,47 м<sup>3</sup>. Отже, різниця в продуктах згорання природного газу і вугілля

становить 18,5 %. При цьому зростає швидкість димових газів в печі, що веде до зниження теплообміну і втрат теплоти [1].

**Мета роботи.** Визначити теплотехнічні показники роботи обертової печі сухого способу виробництва з використанням альтернативних видів палива.

**Результати досліджень.** ВАТ «Івано-Франківськцемент» – підприємство з виробництва цементу, яке працює з 1964 р. Річний обсяг продажу готової цементної продукції становить приблизно 700 тис. тонн. Виробництво цементів є високоенергоємним (близько 60 % коштів становлять паливо і електроенергія). Проблема зниження енергоємності виробництва цементу – це одне з головних завдань цементної промисловості і ВАТ «Івано-Франківськцемент», зокрема. У зв'язку з цим у 2002 р. підприємство перейшло (вперше в Україні) на тверде паливо випалу клінкеру (кам'яне вугілля). У 2008 р. завод перейшов на сухий спосіб виробництва клінкеру (також вперше в Україні), завдяки цьому витрата умовного палива на ВАТ «Івано-Франківськцемент», (мокрый спосіб виробництва до літа 2008 р.) зменшилась від 220 кг/т клінкеру до 100–110 кг/т.

Під час реконструкції технологічної нитки мокрого способу виробництва цементу з переведенням на сухий з використанням вугілля обертова піч вкорочена до 54 м, встановлені чотири сходинки запічних циклонних теплообмінників та декарбонізатор. Встановлення декарбонізатора дало змогу винести найбільш напружену за тепловим навантаженням зону декарбонізації за обертову піч, що дало можливість збільшити частоту обертання і підвищити продуктивність агрегату до 95–105 т клінкеру на годину. Варто зауважити, що в такому тепловому агрегаті частина палива спалюється в обертовій печі, а частина – в декарбонізаторі.

Кам'яне вугілля, як паливо цементної промисловості, повинно відповідати певним вимогам, а саме: мати відповідний елементний склад, теплотворну здатність і вміст летких компонентів у доволі вузьких межах 18–22 %. Тому, як правило, в цементних обертових печах спалюють суміш, яку готують з декількох сортів вугілля розмелюванням [3].

Як паливо на ВАТ «Івано-Франківськцемент» було запропоновано суміш трьох сортів: вугілля марки СС – Кузнецького, АС – Донецького та ГР – Львівсько-Волинського вугільних басейнів. З урахуванням вмісту кожного з сортів був розрахований склад суміші (табл. 2). Розраховувати горіння такого палива проводили за відомими методиками [4].

Таблиця 2

Склад робочого палива

С <sup>p</sup>	Н <sup>p</sup>	Н <sup>p</sup>	О <sup>p</sup>	С <sup>p</sup>	А <sup>p</sup>	W <sup>p</sup>	Σ
62,5	4,0	1,3	4,8	0,8	18,4	8,2	100,0

Розрахункова теплота згорання такого палива становить 24667 кДж/кг. Дійсна витрата атмосферного повітря на спалювання з врахуванням коефіцієнта надлишку його  $\alpha = 1,2$  становить 8,23 м<sup>3</sup>/кг. У разі згорання одного кілограма такої суміші утворюється 8,54 м<sup>3</sup> димових газів.

Нині кількість альтернативного (нетрадиційного) палива (відходи деревообробної та нафтопереробної промисловостей, торф, відпрацьовані шини та суміші на їх основі) становить 15 %. Особливий практичний інтерес становить використання торфу як альтернативного палива. Калорійність торфу становить 11,7–12,4 МДж, зольність коливається в межах 18–19 мас. %. До того ж у разі оптимізації суміші для альтернативного палива необхідно враховувати доволі високий вміст вологи у торфі на рівні 14–19 %. Кількість торфу, необхідного для заміни 10 % вугілля, за вологості 7,5 % та теплотворній здатності  $Q = 3547$  ккал/кг (14,86 МДж/кг) становить на 1 тонну клінкеру –21,9 кг у разі витрати тепла на клінкероутворення 3,25 МДж/кг (775 ккал/кг клінкеру).

Матеріальний баланс горіння на 100 кг палива при  $\alpha = 1,2$  наведено в табл. 3. Дійсна температура горіння вугільного пилу, визначена розрахунковим методом, становить 1581 °С.

## Матеріальний баланс горіння палива

Прихід	кг	Витрата	кг
Паливо	100	Продукти горіння	229,3
Повітря:	243,1	CO <sub>2</sub>	
O <sub>2</sub>		SO <sub>2</sub>	1,7
N <sub>2</sub>	800,5	H <sub>2</sub> O	54,7
H <sub>2</sub> O	10,43	O <sub>2</sub>	801,9
	+8,07	N <sub>2</sub>	40,0
Всього	1154,03		1154,03

Для визначення кількості палива, необхідного для одержання однієї тонни клінкеру, виконано теплотехнічний розрахунок обертової печі, циклонних теплообмінників та декарбонізатора. Встановлено, що витрата палива в печі становить 72 кг на кг клінкеру або 47,6 % від загальної кількості, в декарбонізаторі – 79 кг або 52,4 %. Загальна витрата твердого палива (вугілля) становить 151 кг або 127 кг умовного палива, у той час як витрата палива в обертовій печі мокрого способу виробництва становить 230 кг умовного палива на одну тонну клінкеру [5].

Результати розрахунку теплового балансу теплового агрегату за окремими статтями наведені в табл. 4.

Таблиця 4

## Тепловий баланс пічного агрегату

Статті приходу	кДж/кг клінкеру	%	Витратні статті	кДж/кг клінкеру	%
Теплота згорання палива	3724,7	85,79	Втрата теплоти на клінкероутворення	2256,3	51,93
Теплота сировинної муки	160,0	3,68	Витрата теплоти на випаровування	25,0	0,60
Теплота палива	74,0	1,70	Витрата теплоти з відхідними газами	804,0	18,50
Теплота повітря	381,0	8,78	Втрата теплоти з пиловиносом	37,2	0,80
Нев'язка	+2,1	0,05	Втрата теплоти з клінкером	195,3	4,50
			Втрата теплоти в довкілля	307,0	7,07
			Втрата теплоти з надлишком повітря	717,0	16,50
Разом	4341,8	100,0		4341,8	100

Як свідчать результати розрахунку, витрата теплоти на клінкероутворення становить 2256,3 кДж на 1 кг клінкеру, що становить 51,9 % від всієї витрати теплоти. Це добре погоджується з даними витрат теплоти сучасними тепловими агрегатами сухого способу виробництва цементу [6].

Теплотехнічний розрахунок дає змогу виявити статті, наприклад, втрати теплоти з надлишковим повітрям, відхідними газами та з клінкером, у яких втрати теплоти є більшими порівняно з сучасними тепловими агрегатами. Отже необхідно шукати способи зниження цих втрат.

Результати роботи теплового агрегату на ВАТ «Івано-Франківськцемент» показали ефективність переходу на сухий спосіб виробництва та заміну газового палива на альтернативні види палива [7–9]. Порівняльна характеристика роботи теплового агрегату до і після реконструкції наведена в табл. 5.

Отриманий за сухим способом виробництва портландцементний клінкер характеризується таким мінералогічним складом: C<sub>3</sub>S – 62 ± 3 %, C<sub>2</sub>S – 14 ± 2 %, C<sub>3</sub>A – 7 ± 1 %, C<sub>4</sub>AF – 11 ± 1 %. Товарний клінкер КТ 1-Н відповідає ТУ У Б В.2.7-00030937.12-98. Середня активність після пропарювання становить 38,0 МПа, міцність на стиск через 2 доби – 28,0 МПа, середня активність – 50,8 МПа. Внаслідок впровадження сучасної технології випалу портландцементного клінкеру досягається також значний екологічний ефект: емісія CO<sub>2</sub> зменшується від 1200 до 910 кг на 1 т клінкеру.

## Характеристика теплового агрегату

Дані агрегату	До реконструкції	Після реконструкції
Спосіб виробництва цементу	мокрый	сухий
Довжина обертової печі, м	90	54
Діаметр печі, м	3,6	3,6
Продуктивність, т/добу	456	2280
Теплообмінник	концентратор шламу	Чотирьохступеневий циклонний з декарбонізатором
Клінкерний холодильник	рекуператорний	колосниковий
Частота обертання, об/хв	1,44	5,0
Питома витрата теплоти кДж/кг кл.	6704	3016
Витрата палива, кг ум. палива	228,8	102,9

**Висновки.** Попередній теплотехнічний розрахунок теплового агрегату з виробництва клінкеру за сухим способом з використанням як паливо кам'яного вугілля показав, що витрата палива в обертовій печі становить 72 кг на одну тонну клінкеру, а в декарбонізаторі – 79 кг. Загальна витрата палива в теплому агрегаті становить 151 кг кам'яного вугілля або 127 кг умовного палива. Витрата теплоти на виробництво 1 кг портландцементного клінкеру за попередніми розрахунками становить 4341 кДж.

Використання теплоти відхідних газів для сушіння вугілля під час його розмелювання та встановлення сучасного колосникового холодильника дозволило зменшити витрати теплоти на отримання 1 кг клінкеру до 3016 кДж, що відповідає 102,9 кг умовного палива. Встановлення запічних циклонних теплообмінників і декарбонізатора, в якому спалюється 55 % палива, дозволило збільшити частоту обертання печі до 5,0 об/хв, при цьому продуктивність агрегату зросла до 95–105 т клінкеру за годину. Емісія CO<sub>2</sub> становить 910 кг на 1 т клінкеру.

1. Древицкий Е.Г., Добровольский А.Г., Коробок А.А. *Повышение эффективности работы вращающихся печей.* – М.: Стройиздат, 1990 – 224 с. 2. Дуда В. *Цемент / Пер. с нем. Е.Ш. Фельдмана; Под ред. Б. Юдовича.* – М.: Стройиздат, 1981 – 446 с. 3. Копешович В.М., Авраменко О.И., Здоров А.И. *Топливо цементной промышленности.* – М.: Стройиздат, 1990. – 160 с. 4. Воробьев Х.С., Мазуров Д.Я. *Теплотехнические расчеты цементных печей и аппаратов.* – М: Высш. шк., 1962. – 350 с. 5. *Технология производства цемента сухим способом / И.Ф. Пономарев, Е.Д. Верич, В.С. Черкишин и др.* – К: Будівельник, 1988. – 109 с. 6. *Печные агрегаты цементной промышленности / С.Г. Силенюк, Ю.С. Гризак, В.Н. Лямин и др.* – М.: Машиностроение, 1984. – 168 с. 7. *Енергетичне використання горючих відходів у цементній промисловості / М.А. Саницький, Т.Є. Марків, Ю.Л. Новицький, Т.М. Круць // Будівельні матеріали та виробн.* – К., 2008. – С. 5–8. 8. *Саницький М.А., Марків Т.Є., Круць Т.Н. Влияние альтернативных видов топлива на физико-химические процессы при обжиге портландцементного клинкера.* – “ALITINFORM”. – 2010. – № 6 [12], 2009. – С. 44–49. 9. *Круць Т.М. Енергетичне використання вторинних паливних матеріалів при випалі портландцементного клінкеру // Вісн. Нац. ун-ту «Львівська політехніка».* – 2009. – С. 232–236