

УДК 669.162.1

Мних Антон Сергійович, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри «Електротехніка та енергетичний менеджмент», тел. 066 184-64-98; mnikh.anton@gmail.com; (<https://orcid.org/0000-0001-5421-9778>);

Яковлева Ірина Геннадіївна, д-р техн. наук, проф. зав. каф. «Теплоенергетика», тел. 067 612-04-26;

Пазюк Михайло Юрійович, д-р техн. наук, проф. зав. каф. «Автоматизоване управління технологічними процесами», тел. 067 379-87-56;

Запорізька державна інженерна академія, Запоріжжя, Україна. Пр. Леніна, 226, Запоріжжя, Україна, 69006

ДО ПИТАННЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ПІДГОТОВКИ ТВЕРДОГО ПАЛИВА ДО ТЕПЛОВОЇ ОБРОБКИ АГЛОМЕРАЦІЙНОЇ ШИХТИ

В роботі проведено дослідження з оптимізації роботи чотирьохвалкової дробарки з метою збільшення виходу кондиційної фракції. Вивчено механізм її запропонована методика розрахунку продуктивності дробарки.

Досліджено вплив розміру часток подрібненого палива, на час їх повного згорання.

Ключові слова: коксова дрібнота, антрацитовий штыб, валкова дробарка, шихта.

Мных Антон Сергеевич, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Электротехника и энергетический менеджмент», 066 184-64-98; mnikh.anton@gmail.com; (<https://orcid.org/0000-0001-5421-9778>).

Яковлева Ирина Геннадиевна, д-р техн. наук, проф. зав. каф. «Теплоэнергетика», тел. 067 612-04-26;

Пазюк Михаил Юрьевич, д-р техн. наук, проф. зав. каф. «Автоматизированное управление технологическими процессами», тел. 067 379-87-56;

Запорожская государственная инженерная академия, Запорожье, Украина. Пр. Ленина, 226, Запорожье, Украина, 69006

К ВОПРОСУ ОПТИМИЗАЦИИ ПОДГОТОВКИ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА К ТЕПЛОВОЙ ОБРАБОТКЕ АГЛОМЕРАЦИОННОЙ ШИХТЫ

В работе проведены исследования по оптимизации работы четырехвалковой дробилки с целью увеличения выхода кондиционной фракции. Изучен механизм и предложена методика расчета производительности дробилки.

Исследовано влияние размера частиц дробленого топлива, на время их полного выгорания.

Ключевые слова: коксовая мелочь, антрацитовый штыб, валковая дробилка, шихта.

Mnyh Anton Sergeevich, Associate prof., Cand. Eng. Sc., The department of electrical engineering and energy management, 066 184-64-98; mnikh.anton@gmail.com; (<https://orcid.org/0000-0001-5421-9778>).

Yakovleva Irina Genadievna, Dr. Eng. Sc., prof., The department of Heat power engineering tel. 067 612-04-26;

Pazuk Mihaail Urievich, Dr. Eng. Sc., prof., The department of Automated control of technological processes tel. 067 379-87-56;

Zaporozhye state engineering Academy, Zaporozhye, Ukraine. Lenina 226, Zaporozhye, Ukraine, 69006

TO THE PROBLEM OF OPTIMIZING THE PREPARATION OF SOLID FUEL TO HEAT TREATMENT SINTER MIX

In the work conducted research on the optimization of four-roll crusher in the crushing of coke breeze and anthracite trifle. It is established that natural fuel properties significantly affect the conditioning of the faction in a stable mode of crushing.

Studied the mechanism and the technique of calculation of performance of crusher. Investigation of the mechanism of crushing in the roll crusher led to the conclusion about the necessity of changing the scheme of crushing fuel prior screening, to reduce the abrasive effect of loads on the crushable material.

The influence of size of crushed fuel at the time of his burnout, which causes the temperature of the sintering process of the charge.

Key words: coke breeze, anthracite trifle, roll crusher, charge.

Введение

Агломерация полидисперсных сыпучих материалов это высокотемпературный технологический процесс, основным источником энергии последнего, является теплота горения твердого топлива, в качестве которого выступает коксовая мелочь или антрацитовый штыб.

Подготовка топлива к использованию в агломерационном процессе заключается в его измельчении до требуемого фракционного состава в дробильно-измельчительных установках.

Применяемые за рубежом для дробления топлива молотковые дробилки и стержневые мельницы отличаются нестабильностью показателей измельчения топлива и повышенными удельными затратами энергии. Практика измельчения топлива в отечественном агломерационном процессе связана, в основном, с четырехвалковыми дробилками с более низким, на 18–20 %, содержанием вредных мелких классов, чем у вышеуказанных дробильных машин.

Следует отметить, что для валковых агрегатов так же присуще вредное переизмельчение топлива. Таким образом, исследование механизмов дробления материала в агрегате с целью оптимизации его работы является актуальной научной и практической задачей.

Анализ исследований и публикаций

Температура зоны горения в значительной степени зависит от крупности используемого топлива. При одинаковых условиях горения кондиционный коксик крупностью 0,5–3,0 мм дает более высокую температуру в небольшом временном интервале, по сравнению с фракцией 3,0–5,0 мм, которая имеет меньшую контактную поверхность, в следствии чего, окислительные процессы идут медленнее, с меньшим выделением теплоты. Таким образом, крупные частицы топлива догорают в агломерируемом слое шихты в зоне кристаллизации расплава, растягивая высокотемпературную область и увеличивая механический недожог топлива, а так же потери теплоты с агломератом [1].

При увеличении крупности топлива, увеличивается высота зоны горения, время взаимодействия руды с горящими частицами топлива и степень восстановления рудного вещества. В настоящее время считается, что при дроблении топлива необходимо обеспечить минимальное образование фракции – 0,5 мм, поскольку снижение содержания этой фракции приводит к экономии твердого топлива на 0,5 % [2, 3].

Исследования эффективности применения при спекании руд коксовых отходов, антрацита и других углей различного гранулометрического состава [4, 5], показали, что наибольшая теплота сгорания углерода топлива в слое достигается в случае использования топлива крупностью 0,5–3 мм, рис. 1.



Рис. 1. Эффективная теплота сгорания фракций топлива

Данные, приведенные в [6], свидетельствуют о том, что агломерация шихты, не содержащей мелкой фракции топлива 0–0,5 мм, обеспечивает более высокую (на 100–140° С) температуру в слое, позволяет увеличить на 10–17 % выход годного, повысить удельную производительность на 10–30 %, за счет увеличения скорости спекания.

По данным японских исследователей [7], снижение диапазона крупности твердого топлива до 1–2 мм, в сравнении с более крупным топливом, обеспечило на одной из аглофабрик уменьшение расхода твердого топлива с 57,9 до 46,2 кг/т (на 20 %).

Газодинамика слоя агломерационной шихты существенно зависит от крупности топлива. При увеличении размера частиц топлива от 0–0,5 мм до 0,5–3,0 мм, исходная газопроницаемость повышается с 0,36 до 0,54 м³/м²с [8]. Кроме того, пылеватые фракции 0–

0,5 мм, характеризуются значительными потерями (до 20 %), в результате их уноса продуктами сгорания из нижележащих горизонтов.

Одной из основных характеристик процесса горения топлива является состав газа. При спекании офлюсованного агломерата содержание в отходящих газах CO_2 составляет 17–20 %, CO – 3–5 %, а соотношение CO_2/CO – в пределах 4,5–6,5 [9]. Наличие в пробах газа, взятых вблизи колосниковой решетки, кислорода в количестве 2–12 % свидетельствует о неполном его использовании при агломерации.

Между интенсивностью горения и составом газов в зоне горения имеется связь. Интенсивность горения увеличивается вследствие более тонкого измельчения коксика. При этом, благодаря тому, что с увеличением степени измельчения топлива возрастает температура горения и одновременно уменьшается высота зоны горения, наблюдается понижение содержания CO в отходящих газах из зоны горения.

Постановка задачи

Анализ исследований влияния крупности твердого топлива на процесс агломерации, позволил сделать вывод о необходимости стабилизации крупности топлива в диапазоне 0,5–3,0 мм, при снижении содержания крупных и пылеватых фракций. Применяемые на отечественных аглофабриках четырехвалковые дробилки, являются более эффективными, чем зарубежные аналоги, но характеризуются наличием вредного переизмельчения топлива.

Таким образом, для оптимизации подготовки твердого топлива и интенсификации выхода кондиционной фракции необходимо:

- исследовать физику процесса дробления в четырехвалковой дробилке;
- проанализировать эффективность существующей схемы дробления топлива;
- разработать методику расчета производительности дробилки;
- исследовать влияние крупности дробленого топлива на время его выгорания.

Изложение результатов исследования

Процесс дробления твердого топлива в четырехвалковой дробилке может быть представлен схемой, приведенной на рис. 2.

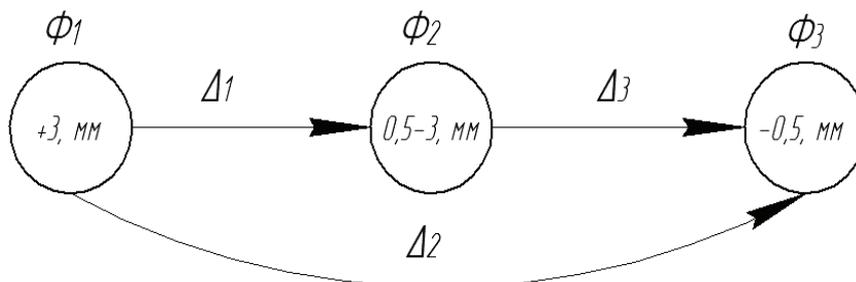


Рис. 2. Механизм дробления материала в четырехвалковой дробилке

Механизм процесса измельчения можно описать следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} \Phi_1' - \Phi_1'' = (\Delta_2 + \Delta_3)t_d; \\ \Phi_2'' - \Phi_2' = (\Delta_1 - \Delta_3)t_d; \\ \Phi_3'' - \Phi_3' = (\Delta_1 - \Delta_2)t_d. \end{cases} \quad (1)$$

где: Φ_i' – содержание i -й фракции в исходном материале, %; Φ_i'' – содержание i -й фракции в дробленом материале, %;

t_d – время дробления, с;

Δ_i – интенсивность измельчения i -й фракции, %/с.

При исследовании механизма процессов в дробильном агрегате принято, что дробление осуществляется в результате сдавливающих ξ_1, ξ_2 (+3,0; 0,5–3,0 мм) и истирающих ξ_3 (0–0,5

мм) воздействий на сыпучую массу. Исходя из того, что ξ_3 является основным источником образования некондиционных пылеватых фракций, с целью обеспечения условия (2), долю этих воздействий в процессе дробления необходимо свести к минимуму. Последнее, возможно осуществить путем изменения схемы подготовки топлива и его дробления в валковом агрегате.

$$\begin{cases} \Phi_1 (+3,0 \text{ мм}) \longrightarrow \min \\ \Phi_2 (0,5 - 3,0 \text{ мм}) \longrightarrow \max \\ \Phi_3 (0 - 0,5 \text{ мм}) \longrightarrow \min \end{cases} \quad (2)$$

Для условий аглофабрики МК «Запорожсталь» в исходном коксике содержание кондиционной фракции (0,5-3,0 мм) достигает 40%, что объясняется использованием отсева коксика доменного производства. Существующая схема дробления рис. 3, обуславливает наличие вредного переизмельчения топлива и увеличения доли истирающих нагрузок при дроблении.

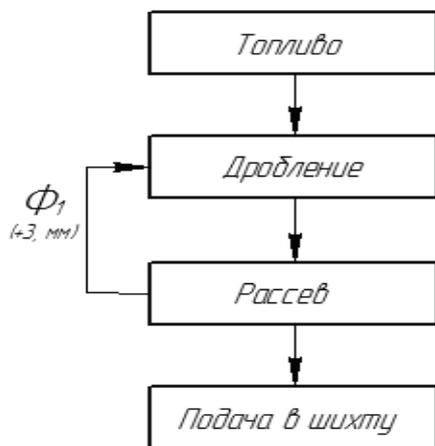


Рис. 3. Существующая схема дробления

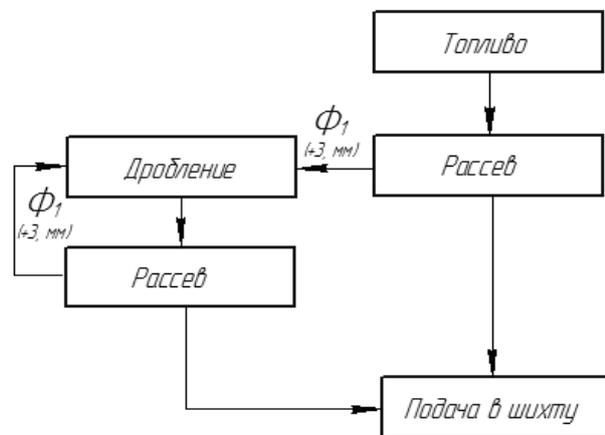


Рис. 4. Предлагаемая схема измельчения

Снижение доли ξ_3 и ее влияния на дробление топлива можно достичь при использовании предложенной авторами схемы измельчения, рис. 4. Предварительный рассев топлива перед дроблением исключит переизмельчение кондиционной и мелкой фракции, а так же увеличит долю сдавливающих нагрузок ξ_1, ξ_2 при измельчении.

Известно, что фракционный состав дробленного топлива в значительной степени зависит от производительности дробильно-измельчительного агрегата. С целью определения оптимальной производительности четырехвалковой дробилки, для обеспечения условия (2), проведены серии опытов по дроблению коксика и антрацитового штыба. Первая серия опытов проводилась при фиксированном грансоставе исходного сырья, производительность дробилки изменялась в диапазоне 10-20 т/ч, за счет изменения количества подаваемого питателем материала. Зазор между первой парой валков составлял 10 мм, между второй 3 мм. Результаты опытов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Влияние производительности дробилки на фракционный состав топлива.

	Исходный	Содержание фракции, %			Исходный	Содержание фракции, %		
		+ 3,0, мм	0,5-3,0, мм	0-0,5, мм		+ 3,0, мм	0,5-3,0, мм	0-0,5, мм
Q, т/ч	коксик	56,6	31,4	12	штыб	36,3	51,4	12,3
10		8	57,2	34,8		8,7	75	16,3
15		11,5	58,7	29,8		9,5	75,3	15,2
20		15,5	50,5	34		13,5	68,3	18,2

Для определения производительности дробилки, обеспечивающей наибольшую интенсивность выхода кондиционной фракции, систему уравнений (1) представим в виде:

$$\begin{cases} \frac{\Phi_1' - \Phi_1''}{t_\partial} = \Delta_2 + \Delta_3 \\ \Delta_1 - \frac{\Phi_2'' - \Phi_2'}{t_\partial} = \Delta_3 \\ \Delta_1 - \frac{\Phi_3'' - \Phi_3'}{t_\partial} = \Delta_2 \end{cases} \quad (3)$$

Решение системы (3) позволило получить результаты, представленные на рис. 5, 6. Из кривых видно, что максимальная интенсивность выхода кондиционной фракции (0,5–3,0 мм) обеспечивается при производительности $Q = 15$ т/ч.

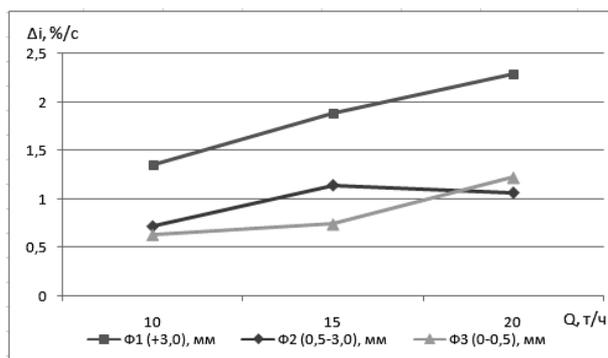


Рис. 5. Интенсивность измельчения фракций коксика

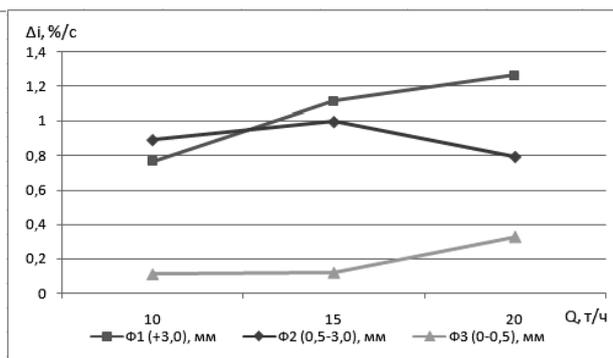


Рис. 6. Интенсивность измельчения фракций штыба

Во второй серии опытов изменялась и производительность и фракционный состав исходного топлива, подаваемого в дробилку. Результаты опытов с изменением фракционного состава твердого топлива после измельчения в валковом агрегате представлены в табл. 2 и табл. 3.

Таблица 2

Фракционный состав исходного и дробленного коксика

Коксик №	Содержание фракции до дробления, %			Содержание фракции после дробления, %		
	Ф1 (+3,0)	Ф2 (0,5-3,0)	Ф3 (0-0,5)	Ф1 (+3,0)	Ф2 (0,5-3,0)	Ф3 (0-0,5)
1	59,77	20,49	19,74	26,41	36,66	36,93
2	58,18	25,57	16,25	48,12	23,18	28,7
3	59,4	27	13,6	35,3	52	13,7
4	63,69	23,74	12,64	37,44	36,36	26,2
5	73,47	18,95	7,58	40,96	33,58	25,46
6	88,56	5,09	6,35	76,43	11,94	11,63

Исходя из графиков, представленных на рис. 7 видно, что вторая серия опытов позволила уточнить значение оптимальной производительности дробилки при дроблении коксика, которая составляет $Q = 14$ т/ч и обеспечивает максимальный выход кондиционной фракции. Интенсивность выхода фракции (0,5-3,0 мм), рис. 8, при этой производительности так же максимальна.

Таблица 3

Фракционный состав исходного и дробленного штыба

Штыб №	Содержание фракции до дробления, %			Содержание фракции после дробления, %		
	Ф1 (+ 3,0)	Ф2 (0,5-3,0)	Ф3 (0-0,5)	Ф1 (+ 3,0)	Ф2 (0,5-3,0)	Ф3 (0-0,5)
1	36	42	22	23,5	49,5	27
2	39	43	18	27,5	53,5	19
3	35	46	19	33	45	22
4	38	42	20	38	41	21
5	37,5	43,25	19,25	30,55	47,55	21,9
6	95,45	2,05	2,5	91,1	5,5	3,4

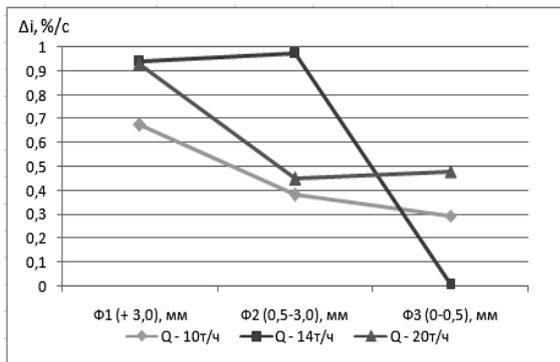


Рис. 7. – Зависимость фракционного состава коксика от производительности

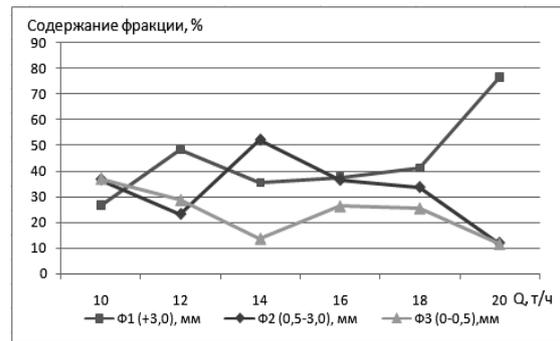


Рис. 8. – Интенсивность измельчения фракций коксика от производительности

В случае дробления антрацитового штыба, оптимальная производительность четырехвалковой дробилки составит $Q = 12$ т/ч, рис. 9. Интенсивность измельчения кондиционной фракции при этой производительности достигает максимальных значений, рис. 10.

Анализ полученных результатов показывает, что при стабильном режиме дробления, спектр крупности дробленного топлива зависит от его природных свойств. Так, по результатам первой серии опытов, при близком гранулометрическом составе исходных материалов минимальное содержание пылеватых фракций (0-0,5 мм) в дробленном коксике в два раза больше чем в штыбе.

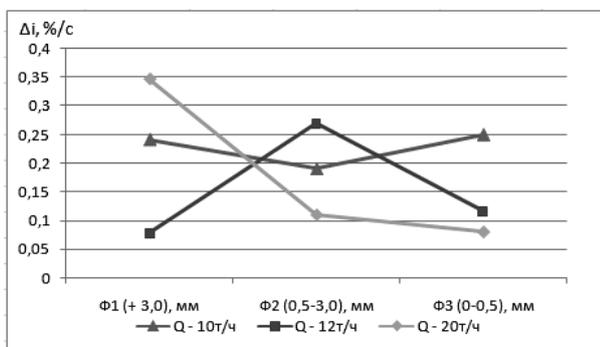


Рис. 9. Зависимость фракционного состава штыба от производительности

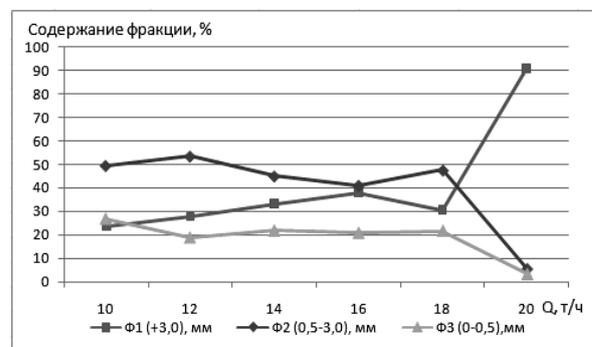


Рис. 10. Интенсивность измельчения фракций штыба от производительности

Анализ результатов расчета Δ_i показывает, что при снижении производительности агрегата уплотняется структура материала, что вызывает пропорциональное снижение интенсивности его дробления под действием сдвливающих нагрузок. Это явление можно объяснить снижением подвижности отдельных частиц и их более плотном примыкании друг к другу, что усиливает влияние истирающих нагрузок, и, как следствие, увеличивает выход пылеватых фракций – 0,5 мм.

Исходя из того, что температура зоны горения и ее высота зависят от крупности топлива, а последнее, в свою очередь, характеризует длительность его горения, в работе проведены исследования по установлению времени выгорания кондиционной фракции твердого топлива.

Экспериментальные данные Карабасова Ю. С. [10] по кинетике выгорания частиц топлива различного размера, позволили установить закон изменения скорости выгорания K_S , который имеет следующий вид:

$$K_S = -\rho \frac{dr}{dt};$$

где: ρ – плотность топлива, кг/м³;

r – размер частицы топлива, м;

t – время горения, с.

Допуская, что в общем виде закон изменения скорости выгорания от диаметра частицы имеет вид:

$$K_S = \frac{A}{d^m}.$$

Имеем:

$$A = \frac{\rho}{2} \frac{1}{m+1} (d_0^{m+1} - d^{m+1}) \frac{1}{t};$$

где: A – эмпирическая константа, кг/м³с;

m – коэффициент, зависящий от диаметра частицы топлива (при $d > 10$ мм, $m \approx 0,5$; при $d < 5$ мм, $m \approx 1$).

Зная размер и плотность частицы топлива, может быть рассчитано время ее полного сгорания:

$$t = \frac{M}{K_S};$$

где: M – масса частицы топлива, кг.

Влияние размера частицы на время ее выгорания представлено на рис. 11. Из полученных результатов видно, что среднее выгорание частицы коксовой мелочи кондиционного размера составляет 48–52 с, а антрацитового штыба 72–76 с.

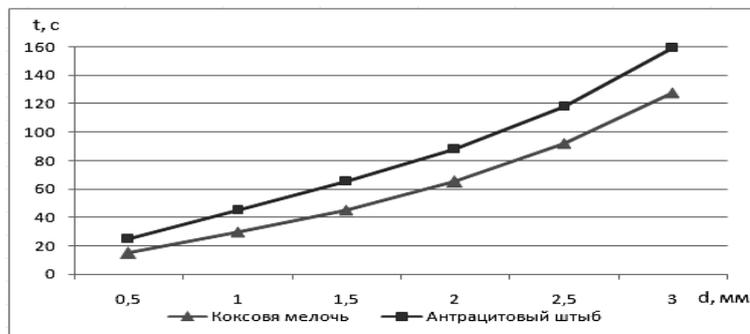


Рис. 11. Зависимость времени выгорания частицы топлива от ее размера

Последнее свидетельствует о более низкой реакционной способности и интенсивности выделения теплоты частицей штыба в сравнении с коксиком, что предопределяет температурный уровень процесса спекания и время пребывания единичных объемов шихты в зоне высоких температур.

Выводы

В работе проведены исследования по оптимизации режимов работы четырехвалковой дробилки при измельчении коксовой мелочи и антрацитового штыба. Установлено, что природные свойства топлива существенно влияют на выход кондиционной фракции при стабильном режиме дробления.

Максимальный выход кондиционной фракции при дроблении коксика обеспечивается при производительности 14 т/ч, а штыба 12 т/ч.

Исследования механизма дробления в валковом агрегате, позволили сделать вывод о необходимости изменения схемы дробления топлива с его предварительным рассевом, с целью снижения влияния истирающих нагрузок на измельчаемый материал.

Установлено влияние крупности дробленного топлива на время его выгорания, что обуславливает температурный режим процесса спекания шихты.

Список использованной литературы:

1. Ефимов С. П. Влияние крупности топлива на процесс агломерации и качество агломерата [Текст]/ С. П. Ефимов, Г. Г. Ефименко // Изв. вузов «Черная металлургия». – 1970. – № 9. – С. 21–25.
2. Карымов, Д. В. Влияние расхода твердого топлива на показатели спекания смеси гематитовых и магнетитовых концентратов [Текст]/ Д. В. Карымов, Г. В. Губин, Л. Н. Саитгареев // Вестник КТУ. – 2011. – №27. – С. 149-151.
3. Бережной Н. Н. Обогащение и окускование сырья [Текст]/ Н. Н. Бережной, В. П. Мовчан // Кривой Рог. – 2000. – 365 с.
4. Крижевский, А. З. Влияние гранулометрического состава спекаемой шихты на расход агломерационного топлива [Текст]/ Крижевский А. З., Рудовский Г. И., Камышный Ю. А. // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 1992. – № 1. – С. 4–6.
5. Auliman K. Stahlund E,-sen, №2, 1994, P. 7–11.
6. Мищенко И. М. Совершенствование технологии и оборудования агломерационного производства [Текст]/ И. М. Мищенко, В. В. Кочура, Я. Ю. Асламова, Г. И. Стамбулжи // Металлургические процессы и оборудование – 2011. – № 3. – С. 35–44.
7. Machida Satoshi. Optimization of coke breeze segregation in sintering bed under high pizolite ore ratio/ Satoshi Michida, Takahide Higuchi, Nobuoki Oyama etc.// ISIJ Int. – 2009/ – № 5. – P. 667–675.
8. Борисов В. М., Пути повышения газопроницаемости агломерационных шихт. [Текст]/ В. М. Борисов, Ю. С. Карабасов, Э. В. Ловчиновский // Окускование руд. – Сер.3. – Вып. 3. ЦНИИ информации и технико-экономических исследований черной металлургии, 1973. С. 29.
9. Новак С. Б. Теория и практика управления агломерационным процессом [Текст]/ С. Б. Новак, Н. И. Гармаш, В. А. Мартыненко// Кривой Рог. – 2006. – 340 с.
10. Карабасов Ю. С. Использование топлива в агломерации [Текст]/ Ю. С. Карабасов, С.М. Валавин. – М.: Металлургия, 1976. – 264 с.

References:

1. Efimov, S. P. (1970). “The effect size of fuel for the sintering process and sinter quality”. [“Vliyanie krupnosti topliva na process aglomeracii i kachestvo aglomerata”], Chernaya metalurgiya, No 9, pp. 21-25.
2. Karimov, D. V. (2011). “The effect of consumption of solid fuels on the performance of sintering a mixture of hematite and magnetite concentrates”. [Vliyanie rashoda tverdogo topliva na pokazateli spekaniya koncentratov], Vestnik KTU, No 27, pp. 149-151.
3. Beregnoj, N. N. (2000). “Beneficiation and agglomeration of raw materials”. [Obogashenie i okuskovanie siryja], Krivoj Rog, 365 p.
4. Krizjevskij, A. Z. (1992). “The influence of the granulometric composition of sinter charge in sinter consumption of fuel”. [Vliyanie gransostava shihty na rashod topliva], Metalurgicheskaya i gornorudnaya promishlenost', No 1, pp. 4-6.
5. Auliman, K. Stahlund E,-sen, №2, 1994, p. 7 – 11.
6. Mishenko, I. M. (2011) “The improvement of technology and equipment of sinter plant”. [Sovershenstvovanie tehnologii i oborudovaniya aglomeracionogo proizvodstva], Metalurgicheskie procesi i oborudovanie, No 3, pp. 35-44.
7. Machida Satoshi. (2009), “Optimization of coke breeze segregation in sintering bed under high pizolite ore ratio”, ISIJ Int. No. 5. – pp.667-675.
8. Borisov, V. M. (1973), “Ways of increasing the permeability of the sinter mix ”.[Puti povisheniya gazopronicaemosti agloshiht], CNII, No 3, 29 p.
9. Novak, S. B. (2006), “The theory and practice of sintering process”. [“Teoriya i praktika upravleniya agloprocesom”], Krivoj Rog, 340 p.
11. Karabasov, U. S. (1976), “Use of fuel in sintering”. [Ispol'zovanie topliva v aglomeracii], Metalurgiya, Moscow, 264 p.

Поступила в редакцию 15.08 2015 г.